

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD
HÍDRICA SUPERFICIAL DE LA SUBCUENCA ALTO HUARMEY”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÍCOLA**

YOMIRA MILAGROS HERRERA SANTIVAÑEZ

LIMA – PERÚ

2023

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SUPERFICIAL DE LA SUBCUENCA ALTO HUARMEY

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

7%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	2%
3	docplayer.es Fuente de Internet	1%
4	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	www.dspace.uce.edu.ec Fuente de Internet	1%
6	es.scribd.com Fuente de Internet	1%
7	aquatool.webs.upv.es Fuente de Internet	1%
8	repositorio.uchile.cl Fuente de Internet	1%
9	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**“IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD
HÍDRICA SUPERFICIAL DE LA SUBCUENCA ALTO HUARMEY”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERA AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. YOMIRA MILAGROS HERRERA SANTIVANEZ

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. RAÚL ARNALDO ESPINOZA VILLAR
Presidente

Mg. Sc. JAVIER ANTONIO GOICOCHEA RÍOS
Asesor

Mg. Sc. LENA CRUZ VILLACORTA
Miembro

Mg.Sc. KENYI GLICERIO CAVALCANTI CÁRDENAS
Miembro

LIMA – PERÚ

2023

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problemática.....	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo principal.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Ciclo hidrológico.....	3
2.2. Cuenca hidrográfica	3
2.3. Precipitación.....	3
2.4. Evapotranspiración.....	3
2.5. Escorrentía.....	4
2.6. Disponibilidad hídrica	4
2.7. Clima y sistema climático	4
2.8. Cambio climático y variabilidad climática.....	5
2.9. Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 - CMIP6.....	6
2.10. Modelos climáticos globales GCM	7
2.11. Regionalización estadística (downscaling)	8
2.12. Escenarios de cambio climático	9
2.13. Modelos hidrológicos	12
2.14. Modelo GR2m.....	14
2.15. Análisis de consistencia.....	15
2.16. Índices estadísticos	16
2.16.1. Índice de eficiencia de Nash (NSE).....	16
2.16.2. Coeficiente de correlación de Pearson.....	17
2.16.3. Índice de eficiencia Kling-Gupta KGE.....	17
III. DESARROLLO DE TRABAJO	19
3.1. Generalidades	19
3.2. Descripción del área de estudio.....	20
3.3. Materiales y equipos.....	22

3.4.	Conceptualización de la metodología.....	22
3.5.	Delimitación de la subcuenca Alto Huarmey	23
3.6.	Recopilación de información hidrometereológica	24
3.7.	Procesamiento de datos hidrometereológicos	27
3.8.	Ajuste del modelo hidrológico GR2m.....	32
3.9.	Selección del modelo de cambio climático de CMIP6.....	35
3.9.1.	Recopilación y preselección del GCM.....	35
3.9.2.	Reducción de escala de los GCM.....	36
3.9.3.	Modelos climáticos GCM seleccionados	40
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
4.1.	Proyecciones de precipitación y temperatura media	47
4.2.	Disponibilidad hídrica superficial	50
V.	CONCLUSIONES	56
VI.	RECOMENDACIONES	58
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
VIII.	ANEXOS	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Lista de estaciones climáticas del área de estudio.....	24
Tabla 2: Coeficientes de correlación	32
Tabla 3: Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe.....	34
Tabla 4: Coeficiente de ajuste para series de precipitación corregidas	44
Tabla 5: Coeficiente de ajuste para series de temperatura corregidas.....	46
Tabla 6: Caudales promedio mensual de la cuenca Huarmey hasta el puente Huamba.....	51
Tabla 7: Distribución mensual de la cuenca Huarmey hasta el puente Huamba.....	52
Tabla 8: Caudales promedio mensual de la subcuenca Alto Huarmey	54
Tabla 9: Distribución mensual de la subcuenca Alto Huarmey	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Componentes del sistema climático.....	5
Figura 2: Concentración de CO2 equivalente (ppm) para distintos escenarios de emisión	10
Figura 3: Escenarios de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP).....	11
Figura 4: Clasificación de los modelos hidrológico	13
Figura 5: Modelo de tipo agregado (A), semidistribuido (B) y distribuido (C).....	14
Figura 6: Esquema del Modelo GR2M	15
Figura 7: Subcuencas de la cuenca del río Huarmey.....	21
Figura 8: Escenarios de evaluación	22
Figura 9: Diagrama de flujo de la metodología.....	23
Figura 10: Cuenca de río Huarmey hasta el Puente Huamba	24
Figura 11: Estaciones climáticas de la Cuenca de Huarmey hasta el Puente Huamba	26
Figura 12: Comparación de datos de temperatura mensual con metodología <i>downscaling</i> y datos PISCO de la estación Aija.....	27
Figura 13: Comparación de datos de temperatura mensual con metodología <i>downscaling</i> y datos SENAMHI Aija	28
Figura 14: Comparación de datos de temperatura mensual con metodología <i>downscaling</i> y datos PISCO de la Estación Malvas	28
Figura 15: Comparación de datos de temperatura mensual con metodología <i>downscaling</i> y datos SENAMHI de la Estación Malvas	29
Figura 16: Comparación de datos de temperatura mensual con metodología <i>downscaling</i> y datos PISCO de la Estación Recuay.....	30
Figura 17: Comparación de datos de temperatura mensual con metodología <i>downscaling</i> y datos SENAMHI de la Estación Recuay	30
Figura 18: Precipitación promedio mensual de las estaciones	31
Figura 19: Temperatura media mensual de las estaciones climáticas	31
Figura 20 Precipitación media histórica del año 1984 al año 2014.....	33
Figura 21 Temperatura media histórica del año 1984 al año 2014	33
Figura 22: Caudales mensuales del año 1984 al año 1986 para el área de estudio	34
Figura 23: Datos descargados de precipitación del modelo GCM ACCESS-CM2	35
Figura 24: Reducción de escala de precipitación del modelo GCM AWI-CM-1-1-MR.....	36

Figura 25: Reducción de escala de precipitación del modelo GCM BCC-CSM2-MR.....	37
Figura 26: Reducción de escala de precipitación del modelo GCM CNRM-ESM2-1 f2 ...	37
Figura 27: Reducción de escala de precipitación del modelo GCM HadGEM3-GC31- MM f3.....	38
Figura 28: Reducción de escala de precipitación del modelo GCM NESM3	38
Figura 29: Reducción de escala de temperatura media del modelo GCM CNRM- ESM2-1 f2	39
Figura 30: Reducción de escala de temperatura media del modelo GCM MIROC6	39
Figura 31: Reducción de escala de temperatura media del modelo GCM MIROC- ES2L f2 y.....	40
Figura 32: Reducción de escala de temperatura media del modelo GCM MRI-ESM2-0...	40
Figura 33: Comparación de la precipitación del modelo GCM AWI-CM-1-1-MR escalado y precipitación media observada.....	41
Figura 34: Comparación de la precipitación del modelo GCM AWI-CM-1-1-MR escalado y precipitación media observada.....	42
Figura 35: Comparación de la precipitación del modelo GCM AWI-CM-1-1-MR escalado y precipitación media observada.....	42
Figura 36: Comparación de la precipitación del modelo GCM AWI-CM-1-1-MR escalado y precipitación media observada.....	43
Figura 37: Comparación de la precipitación del modelo GCM AWI-CM-1-1-MR escalado y precipitación media observada.....	43
Figura 38: Comparación de la temperatura media del modelo GCM CNRM-ESM2-1 f2 escalado y temperatura media observada	44
Figura 39: Comparación de la temperatura media del modelo GCM MIROC6 escalado y temperatura media observada	45
Figura 40: Comparación de la temperatura media del modelo GCM MIROC-ES2L f2 escalado y temperatura media observada	45
Figura 41: Comparación de la temperatura media del modelo GCM MRI-ESM2-0 escalado y temperatura media observada	46
Figura 42: Precipitación media para el escenario Futuro I (2015-2045).....	47
Figura 43: Precipitación media para el escenario Futuro II (2046-2076)	47
Figura 44: Temperatura media para el escenario Futuro I (2015-2045).....	48
Figura 45: Temperatura media para el escenario Futuro II (2046-2076)	48
Figura 46: Precipitación promedio para cada escenario (Actual, Futuro I y Futuro II)	49

Figura 47: Temperatura promedio para cada escenario (Actual, Futuro I y Futuro II).....	49
Figura 48: Disponibilidad hídrica del escenario actual (1984-2014) de la cuenca del río Huarmey hasta el puente Huamba	50
Figura 49: Disponibilidad hídrica del escenario futuro I (2015-2045) de la cuenca del río Huarmey hasta el puente Huamba.....	50
Figura 50: Disponibilidad hídrica del escenario futuro II (2046-2076) de la cuenca del río Huarmey hasta el puente Huamba.....	51
Figura 51: Distribución mensual de caudales de la cuenca del río Huarmey hasta el puente Huamba	52
Figura 52: Disponibilidad hídrica de la subcuenca Alto Huarmey	53
Figura 53: Disponibilidad hídrica de la subcuenca Alto Huarmey	53
Figura 54: Disponibilidad hídrica de la subcuenca Alto Huarmey	54
Figura 55: Distribución mensual de la subcuenca Alto Huarmey	55
Figura 56: Temperatura mensual del GCM ACCESO-CM2	62
Figura 57: Temperatura mensual del GCM ACCESO-ESM1-5	63
Figura 58: Temperatura mensual del GCM AWI-CM-1-1-MR	63
Figura 59: Temperatura mensual del GCM BCC-CSM2-MR	64
Figura 60: Temperatura mensual de GCM CanESM5 p1	64
Figura 61: Temperatura mensual de GCM CanESM5-CanOE p2	65
Figura 62: Temperatura mensual CESM2-WACCM	65
Figura 63: Temperatura mensual CIESM.....	66
Figura 64: Temperatura mensual CNRM-CM6-1 f2.....	66
Figura 65: Temperatura mensual CNRM-CM6-1-HR f2.....	67
Figura 66: Temperatura mensual CNRM-ESM2-1 f2.....	67
Figura 67: Temperatura mensual EC-Tierra3-Veg.....	68
Figura 68: Temperatura mensual FGOLES-g3	68
Figura 69: Temperatura mensual GFDL-ESM4.....	69
Figura 70: Temperatura mensual GISS-E2-1-G p3.....	69
Figura 71: Temperatura mensual HaGEM3-GC31-LL f3.....	70
Figura 72: Temperatura mensual HadGEM3-GC31-MM f3.....	70
Figura 73: Temperatura mensual INM-CM4-8	71
Figura 74: Temperatura mensual INM-CM5-0	71
Figura 75: Temperatura mensual IPSL-CM6A-LR.....	72
Figura 76: Temperatura mensual KACE-1-0-G	72

Figura 77: Temperatura mensual MCM-UA-1-0	73
Figura 78: Temperatura mensual MIROC6.....	73
Figura 79: Temperatura mensual MIROC-ES2L f2.....	74
Figura 80: Temperatura mensual MPI-ESM1-2-HR.....	74
Figura 81: Temperatura mensual MPI-ESM1-2-LR	75
Figura 82: Temperatura mensual MRI-ESM2-0	75
Figura 83: Temperatura mensual NESM3.....	76
Figura 84: Temperatura mensual NorESM2-LM	76
Figura 85: Temperatura mensual UKESM1-0-LL f2.....	77
Figura 86: Precipitación mensual de GCM ACCESO-CM2.....	78
Figura 87: Precipitación mensual de GCM ACCESO-ESM1-5.....	78
Figura 88: Precipitación mensual de GCM AWI-CM-1-1-MR	79
Figura 89: Precipitación mensual de GCM BCC-CSM2-MR.....	79
Figura 90: Precipitación mensual de GCM CanESM5 p1.....	80
Figura 91: Precipitación mensual de GCM CanESM5-CanOE p2	80
Figura 92: Precipitación mensual de GCM CESM2	81
Figura 93: Precipitación mensual de GCM CESM2-WACCM	81
Figura 94: Precipitación mensual de GCM CIESM.....	82
Figura 95: Precipitación mensual de GCM CMCC-CM2-SR5.....	82
Figura 96: Precipitación mensual de GCM CNRM-CM6-1-HR f2	83
Figura 97: Precipitación mensual de GCM CNRM-ESM2-1 f2	83
Figura 98 Precipitación mensual de GCM EC-Earth3-Veg	84
Figura 99 Precipitación mensual de GCM FGOLES-f3-L.....	84
Figura 100: Precipitación mensual de GCM FGOALS-g3	85
Figura 101: Precipitación mensual de GCM FIO-ESM-2-0.....	85
Figura 102: Precipitación mensual de GCM GFDL-ESM4	86
Figura 103: Precipitación mensual de GCM GISS-E2-1-G p3	86
Figura 104: Precipitación mensual de GCM HaGEM3-GC31-LL f3	87
Figura 105: Precipitación mensual de GCM HadGEM3-GC31-MM f3.....	87
Figura 106: Precipitación mensual de GCM INM-CM4-8.....	88
Figura 107: Precipitación mensual de GCM NM-CM5-0.....	88
Figura 108: Precipitación mensual de GCM IPSL-CM6A-LR	89
Figura 109: Precipitación mensual de GCM KACE-1-0-G	89
Figura 110: Precipitación mensual de GCM MIROC6.....	90

Figura 111: Precipitación mensual de GCM MIROC-ES2L f2	90
Figura 112: Precipitación mensual de GCM MPI-ESM1-2-HR	91
Figura 113: Precipitación mensual de GCM MRI-ESM2-0.....	91
Figura 114: Precipitación mensual de GCM NESM3	92
Figura 115: Precipitación mensual de GCM NoESM2-MM.....	92
Figura 116: Precipitación mensual de GCM UKESM1-0-LL-f2	93

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Modelos GCM de la variable de temperatura media	62
Anexo 2: Modelos GCM de la variable de precipitación	78

RESUMEN

Este estudio se enfocó en evaluar el impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca Alto Huarmey. Se consideró un escenario actual para el periodo 1984- 2014 con información observada de precipitación y temperatura media y dos escenarios futuros I (2015 al 2045) y II (2046 al 2076) que empleó los datos de las variables de precipitación y temperatura de modelos climáticos globales GCM. Luego se aplicó la técnica de regionalización estadística para ajustar y mejorar los datos climáticos de los modelos climáticos globales GCM del *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* a la escala local del área de estudio, donde se obtuvo que los coeficientes de ajuste estadísticos para el modelo NESM3 fueron los más adecuados para representar la precipitación, mientras que el modelo MIROC6 fue el mejor para la temperatura media. Después, se calculó los caudales mensuales con el modelo GR2M para el escenario actual y se ajustó estadísticamente con la información de la estación hidrométrica “Puente Huamba”; en el caso de los escenarios futuros I y II se estimó los caudales a partir de la información de precipitación NESM3 y temperatura MIROC6. Finalmente, al evaluar el impacto del cambio climático de la disponibilidad hídrica en la subcuenca Alto Huarmey se observó una tendencia al aumento en la disponibilidad hídrica superficial en los escenarios futuros I y II respecto al escenario actual, especialmente en el mes de marzo. Estos hallazgos son valiosos para la planificación y gestión de recursos hídricos en la región, aunque es importante precisar que los modelos climáticos tienen limitaciones y suposiciones que deben ser consideradas en la interpretación de los resultados.

Palabras clave: Alto Huarmey, cambio climático, disponibilidad hídrica, modelos climáticos GCM y CMIP6.

ABSTRACT

This study focused on evaluating the impact of climate change on the surface water availability of the Upper Huarmey sub-basin. An existing scenario for the period 1984-2014 was considered, using observed data for precipitation and average temperature, along with two future scenarios: I (2015 to 2045) and II (2046 to 2076), which utilized data from the variables of precipitation and temperature from global climate models (GCM). Subsequently, the technique of statistical regionalization was applied to adjust and improve the climatic data from the GCM global climate models of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 to the local scale of the study area. It was found that the statistical adjustment coefficients for the NESM3 model were the most suitable for representing precipitation, while the MIROC6 model was the best for representing the average temperature. Then, monthly flows were calculated using the GR2M model for the current scenario and statistically adjusted with information from the "Puente Huamba" hydrometric station. For future scenarios I and II, flows were estimated based on NESM3 precipitation information and MIROC6 temperature information. Finally, when evaluating the impact of climate change on the water availability in the Upper Huarmey sub-basin, an increasing trend in surface water availability was observed in future scenarios I and II compared to the current scenario, especially in the month of March. These findings are valuable for water resource planning and management in the region, although it is important to note that climate models have limitations and assumptions that must be considered in interpreting the results.

Keywords: Alto Huarmey, *climate change, water availability, GCM (Global Climate Models) and CMIP6.*

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática

El impacto de las condiciones atmosféricas variables se hace sentir directamente en el Perú, afectando áreas fundamentales como la agricultura, la pesca y el turismo. Estos cambios, tanto a nivel local como global, desencadenan eventos naturales extremos como inundaciones y sequías. Según el último informe del IPCC, la actividad humana es claramente responsable del calentamiento del planeta, con consecuencias significativas para los sistemas naturales y las comunidades en todo el mundo. De acuerdo con el SENAMHI, Perú se encuentra entre los países más perjudicados por la variabilidad y el cambio climático (SENAMHI, 2021).

La disponibilidad hídrica superficial es un aspecto crucial para la gestión adecuada de los recursos hídricos en cualquier área (ANA, 2016). En el actual contexto de cambio climático, es crucial analizar cómo la disponibilidad de agua en las diversas cuencas hidrográficas podría verse afectada. En este sentido, el presente estudio se enfocó en la evaluación mensual de la disponibilidad de agua en la superficie de la subcuenca Alto Huarmey. Se consideraron tanto el escenario actual (1984-2014) como los escenarios futuros I (2015-2045) y II (2046-2076), utilizando un enfoque basado en el cambio climático proporcionado por los modelos del proyecto *Coupled Model Intercomparison Project CMIP6*.

La disponibilidad hídrica mediante el modelo *Global Rainfall-Runoff Two Parameter Model* (GR2M) fue ajustado con datos de la estación hidrométrica “Puente Huamba” en el escenario actual se realizó con datos observados en el área local. Para evaluar los impactos del cambio climático en disponibilidad hídrica del escenario futuro I y II, se utilizó los datos de los modelos matemáticos que representan los procesos físicos, químicos y biológicos relacionados con el clima. Estos modelos se dividen en dos categorías principales: los Modelos de Circulación Global (GCM, por sus siglas en inglés) y los Modelos Climáticos

Regionales (RCM por sus siglas en inglés) (Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC], 2021). Los GCM son representaciones matemáticas de la circulación atmosférica u oceánica a escala global, pero su resolución espacial limitada dificulta su aplicación a nivel local. Por otro lado, los RCM se utilizó para reducir la resolución gráfica espacial y adaptar los datos a escalas locales, aunque su disponibilidad es limitada y su generación requiere un alto procesamiento computacional. Entonces, para evaluar el impacto climático en los escenarios futuros I y II, se utilizó la información de temperatura y precipitación de GCM más indicado para el área de estudio después de hacer una preselección y escalamiento de la información global, a una escala local con el modelo previamente seleccionado, luego se estimó la disponibilidad hídrica para los escenarios futuros I y II considerando la Trayectoria Socioeconómica Compartida (SSP) 5.8.5. Finalmente, se evaluó la variabilidad cualitativa y cuantitativa de la disponibilidad hídrica en el escenario actual y escenarios futuros I y II.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo principal

Evaluar la disponibilidad hídrica superficial mensual en la subcuenca Alto Huarmey, bajo el escenario actual (1984- 2014), escenario futuro I (2015-2045) y escenario futuro II (2046-2076) de cambio climático proporcionados por los modelos del proyecto *Coupled Model Intercomparison Project CMIP6*.

1.2.2. Objetivos específicos

- Seleccionar el modelo climático óptimo para la subcuenca de Alto Huarmey del *Coupled Model Intercomparison Project CMIP 6*.
- Calcular las proyecciones mensuales de precipitación y temperatura para escenarios futuros I y II.
- Estimar y evaluar la disponibilidad hídrica a nivel mensual en el escenario actual (1984 - 2014), escenario futuro I (2015-2045) y escenario futuro II (2046-2076).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el conjunto de procesos que experimenta el agua en la naturaleza en sus diferentes estados (sólido, líquido, gaseoso) y diversas formas (agua superficial, agua subterránea, etc.) (Villón, 2002).

2.2. Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica de un río es el área geográfica que presenta como principal entrada a la lluvia, y como salidas el caudal, la evapotranspiración, el flujo subsuperficial y la percolación. La cuenca hidrográfica debe conceptualizarse como un conjunto armónico con profunda interacción entre cada una de sus partes (Fattorelli y Fernández, 2011).

2.3. Precipitación

Es toda forma de humedad que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie del suelo. Según este concepto puede darse en forma de: lluvias, granizadas, garuas y nevadas (Villón, 2002). La superficie terrestre presenta como fuente primaria de agua a la precipitación. Por ello, las mediciones y análisis de precipitación son fundamentales para estudios correspondientes al uso y control del agua (Villón, 2002).

2.4. Evapotranspiración

Es la combinación de la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación. Los factores que dominan la evapotranspiración son: el suministro de energía, transporte de vapor, contenido de humedad en el suelo y las características del tipo de cobertura vegetal (Chow et al., 1994; Food Agriculture Organization [FAO], 1996).

2.5. Escorrentía

La escorrentía es el agua que tiene como origen a la precipitación y circula hacia a una corriente para, finalmente, ser drenada por la salida de la cuenca. El escurrimiento total a la salida de una cuenca está compuesto por la escorrentía directa y flujo base (Aparicio, 1992).

2.6. Disponibilidad hídrica

La disponibilidad de agua en una cuenca hidrográfica se refiere al volumen total de agua que ha caído como precipitación y que puede ser utilizado para diversos fines, como riego, generación de energía eléctrica y suministro de agua potable, entre otras (SENAMHI, 2023). Conocer esta disponibilidad hídrica es fundamental para optimizar la gestión de una presa y aprovechar al máximo los recursos de agua disponibles. Por ejemplo, consideramos un sistema que ha sido diseñado para múltiples usos, como el control de inundaciones y la producción de energía eléctrica. Estos dos usos pueden entrar en conflicto, debido a que, para un control efectivo de inundaciones, es preferible mantener el embalse lo más vacío posible, mientras que para la generación de energía eléctrica es necesario mantener el nivel del embalse alto (SENAMHI, 2023).

Si tenemos información sobre la disponibilidad hídrica en la cuenca, el operador del sistema de múltiples usos puede gestionar el embalse de manera estratégica. Por ejemplo, puede vaciar el embalse antes de una posible inundación debido a una precipitación reciente, y luego almacenar agua cuando sea necesario para la generación de energía eléctrica (SENAMHI, 2023).

2.7. Clima y sistema climático

El sistema climático, es un sistema muy complejo conformado por cinco elementos o subsistemas: la atmósfera (capa gaseosa que rodea la Tierra), litósfera (capa externa y sólida de la Tierra), criósfera (parte de la Tierra conformada por agua congelada), hidrósfera (aguas superficiales y subterráneas) y biosfera (conjunto de ecosistemas y organismos vivos). Y el clima es el estado del sistema climático, producto de la interacción entre esos cinco subsistemas (IPCC, 2014).

El sistema climático (Figura 1) evoluciona a través del tiempo por la influencia de factores o

forzamientos internos, como el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y externos, como erupciones volcánicas, variaciones de la actividad solar, actividades antropogénicas que modifican la composición de la atmosfera y el uso del suelo (Solman, 2011).

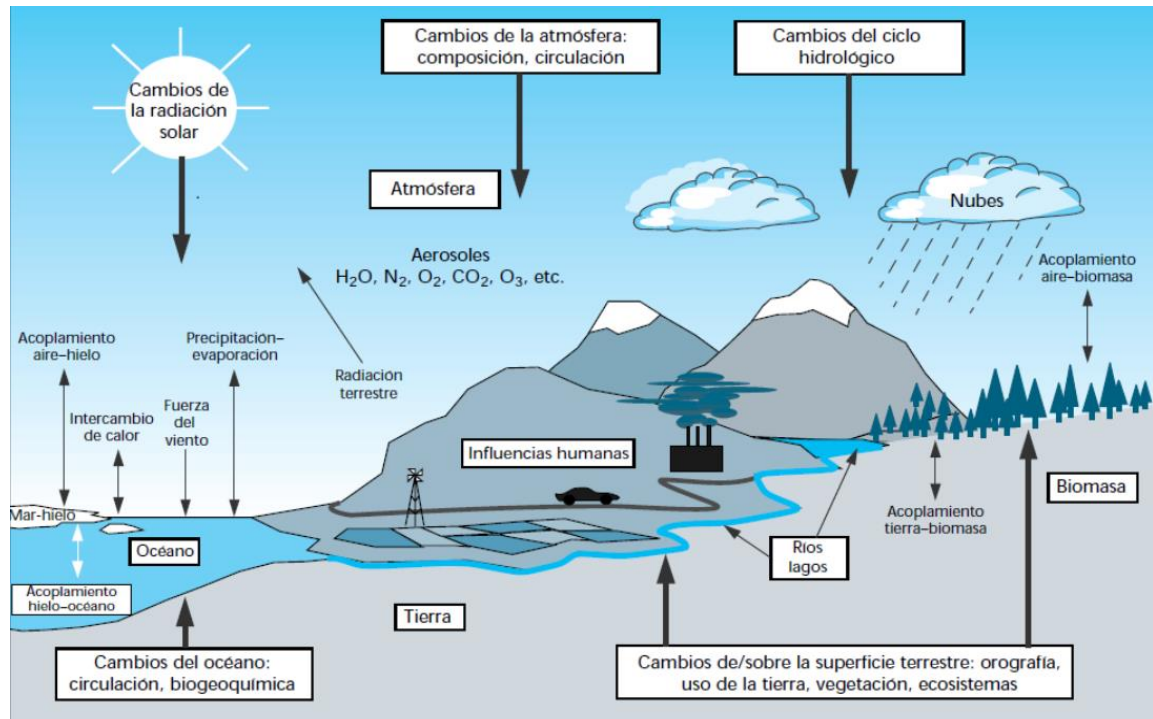


Figura 1: Componentes del sistema climático

FUENTE: Solman (2011)

En el Perú, las características climáticas, son determinadas por la influencia de la Cordillera de los Andes, la Corriente Peruana o del Humboldt y el Anticiclón del Pacífico Sur, que generan una diversidad de climas. En el país, se identificaron 38 tipos de climas a nivel nacional, de acuerdo con la última actualización del Mapa de Clasificación Climática del Perú, esta herramienta de gestión permite orientar en la planificación de actividades sociales, ambientales y toma de decisiones para contribuir con el desarrollo del país (SENAMHI, 2020).

2.8. Cambio climático y variabilidad climática

Se define como la variación del estado del clima durante largos períodos de tiempo; esta variación puede ser producto de procesos internos naturales o factores externos, tales como, erupciones volcánicas, variación de los ciclos solares o actividades humanas persistentes que modifican la composición de la atmósfera o suelo (IPCC, 2014).

La variabilidad climática refiere a variaciones en las condiciones climáticas medias, y otras estadísticas del clima (como las desviaciones típicas y los fenómenos extremos, entre otras), en todas las escalas temporales y espaciales que se extienden más allá de la escala de un fenómeno meteorológico en particular. Es manifestada, por ejemplo, por fenómenos naturales como el evento cálido de El Niño y su contraparte fría, La Niña, conocidos conjuntamente como El Niño Oscilación Sur (ENSO)(IPCC, 2007).

Entonces se resume a la variabilidad climática como las fluctuaciones de las condiciones predominantes de una zona, mientras que el cambio climático es la modificación de esas condiciones predominantes alrededor de la cual oscilan esas condiciones.

2.9. Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 - CMIP6

El CMIP6, significa "Coupled Model Intercomparison Project Phase 6" en inglés, es un proyecto de colaboración global en el campo de la climatología y la ciencia del clima. Su objetivo es mejorar la comprensión de los modelos climáticos acoplados y sus proyecciones sobre el cambio climático (IPCC, 2021).

El CMIP6 es la sexta fase de este proyecto y se centra en mejorar la precisión y la capacidad de los modelos climáticos para proyectar los cambios futuros en el clima en comparación con las fases anteriores. Participan instituciones de investigación de todo el mundo, y cada una de ellas contribuye con sus propios modelos climáticos y escenarios de emisiones. Estos modelos son luego utilizados para realizar simulaciones y proyecciones climáticas en diferentes condiciones, lo que ayuda a los científicos a comprender mejor cómo podrían evolucionar las condiciones climáticas en el futuro en función de diferentes factores, como las emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2021).

Los resultados y datos generados por el CMIP6 son fundamentales para la elaboración de informes como los del Panel Intergubernamental sobre el cambio climático, que proporcionan información crucial para la toma de decisiones en políticas climáticas y la comprensión de los impactos del cambio climático en diversos aspectos de la sociedad y el medio ambiente (IPCC, 2021).

2.10. Modelos climáticos globales GCM

Los modelos climáticos globales o modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés) son representaciones numéricas que nos dan una visión de la evolución del sistema climático a través del tiempo basándose en ecuaciones fundamentales para explicar sus características físicas, químicas y biológicas; a su vez representan un mayor desarrollo porque simulan la mejor respuesta ante el aumento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero a través de una grilla geográfica global que muestra las interacciones de los componentes climáticos (IPCC, 2007).

Estos modelos son utilizados para comprender cómo funcionan los diferentes sistemas de la tierra y cómo interactúan entre sí para influir en el clima global. Los GCM se basan en principios físicos, químicos y matemáticos para simular los procesos atmosféricos y oceánicos que afectan el clima (IPCC, 2007).

Los GCM se utilizan para hacer proyecciones climáticas a largo plazo bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero y otros factores. Estas proyecciones ayudan a los científicos y responsables políticos a comprender cómo podría evolucionar el clima en el futuro y cuáles podrían ser los posibles impactos en diversas regiones del mundo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los modelos climáticos son simplificaciones de sistemas extremadamente complejos, por lo que las proyecciones incluyen incertidumbres y requieren una constante validación y ajuste mediante observaciones del mundo real (IPCC, 2007).

Como se mencionó anteriormente, los modelos de circulación general (GCM), fundamentados en la mecánica de fluidos y la termodinámica, modelan el comportamiento de variables climáticas a nivel global y proveen información futura del clima bajo distintos escenarios. Sin embargo, los resultados que estos permiten obtener para patrones locales resultan no ser concluyentes; el uso de métodos de regionalización dinámica permite, en muchos casos, mejorar la resolución espacial de estos para finalmente obtener modelos climáticos regionales (RCM, Regional Climate Model), no obstante, los RCM no se encuentran disponibles para todas las regiones.

Ante la falta de un RCM disponible, se hace uso de la regionalización estadística mediante el método downscaling para corregir las variables climáticas de los GCM a nivel areal, según la serie de datos asignada para el área del proyecto.

2.11. Regionalización estadística (downscaling)

El downscaling estadístico se trata de una técnica sofisticada en el conjunto de las denominadas de regionalización estadística. Su aplicación permite corregir el ya explicado sesgo de información climática existente en los modelos climáticos GCM a nivel local, esto es, un área relativamente pequeña: ciudad o cuenca.

En la clasificación de los métodos de regionalización o downscaling es posible definir dos grandes grupos, aunque no únicos, los métodos estadísticos paramétricos y no paramétrico (Feigenwinter *et al*, 2018).

Para los métodos de regionalización estadística de transformaciones paramétricas, el objetivo es encontrar una función lineal o no lineal entre datos observados y modelados o simulados (del GCM), donde la información observada es la variable dependiente y la información del modelo es la independiente. Así, el éxito de la aplicación del modelo radica en la determinación de los coeficientes que permitan el modelado eficiente de los datos. Por otro lado, los métodos de transformaciones no paramétricas, emplea distribuciones teóricas de probabilidad como función. Estos son los denominados Quantil mapping (Feigenwinter, *et al*, 2018).

En general, la función teórica de probabilidad Gamma es usada como función de transferencia. Sin embargo, se propone también el uso de una mixtura dada por dos funciones teóricas, siendo Bernoulli-Gamma la de principal aplicación y la utilizada en este estudio. La mixtura Bernoulli-Gamma presenta tres parámetros: ρ perteneciente a la función teórica de probabilidad de Bernoulli, utilizada para la modelación de ocurrencia de valores nulos y con una probabilidad dada por $1 - \rho$; además se tiene parámetros de forma α y escala β , provenientes de la función Gamma (Feigenwinter, *et al*, 2018).

La función de densidad está dada:

$$f(x) = \begin{cases} \rho \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} & \forall x > 0 \\ 1 - \rho & \forall x = 0 \end{cases}$$

2.12. Escenarios de cambio climático

Con el objetivo de realizar proyecciones climáticas, se propuso diferentes escenarios futuros, dependiendo de las emisiones de gases de efecto invernadero (Figura 2) llamados Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Existe un escenario pesimista, donde el forzamiento radiativo aumenta a lo largo del siglo XXI (RCP8.5), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6) y un escenario optimista (RCP2.6), en donde se tiene un alto grado de mitigación (Moss *et al.*, 2008). A continuación, el detalle de los RCP.

- RCP 2.6: Escenario de declinación, asumiendo una reducción sustancial de las emisiones de GEI a lo largo del tiempo, para lograr su forzamiento radiativo llega primero a 3.1 W/m² en 2050 y a 2.6 W/m² en 2100. Probablemente, la temperatura no exceda los 2 °C (Moss *et al.*, 2008).
- RCP 4.5: Escenario de estabilización, donde el forzamiento radiativo se estabiliza luego del 2100; de igual forma, la temperatura probablemente no exceda los 2 °C (Moss *et al.*, 2008).
- RCP 6.0: Escenario de estabilización, el forzamiento radiativo se estabiliza poco luego del 2100, sin forzamiento gracias a la aplicación de varias tecnologías y estrategias de reducción de GEI, aunque la temperatura probablemente exceda los 2 °C (Moss *et al.*, 2008).
- RCP 8.5: Se presenta un incremento de las emisiones de GEI, para lo cual se espera que las temperaturas no excedan los 4 °C (Moss *et al.*, 2008).

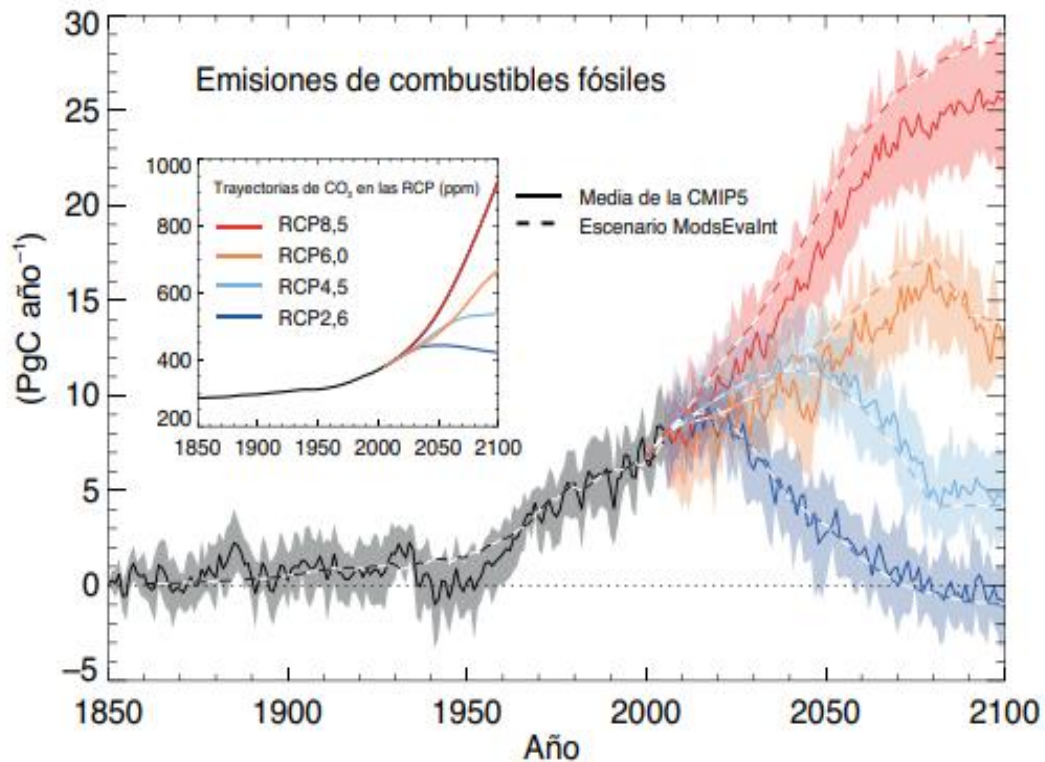


Figura 2: Concentración de CO₂ equivalente (ppm) para distintos escenarios de emisión

FUENTE: Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC] (2013)

También se plantea el uso de escenarios denominados Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP que buscan incorporar las dimensiones del cambio social esperado que podrían afectar tanto los niveles de emisiones como la mitigación y la adaptación al cambio climático (Escoto *et al.*, 2017).

A continuación, se describe cada Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (Figura 3):

- **SSP1: Mundo Sostenible** - Representa un futuro en el que existe una convergencia global hacia una mayor equidad, desarrollo sostenible y una mejor gestión ambiental. Se caracteriza por un enfoque en la sostenibilidad, la cooperación internacional y la inversión en tecnologías limpias (IPCC, 2021).
- **SSP2: Rutas del Medio** - Describe un futuro en el que se mantienen las tendencias actuales de desarrollo económico y social sin cambios drásticos. Se caracteriza por un crecimiento moderado, desigualdades persistentes y un enfoque equilibrado entre el desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental (IPCC, 2021).

- SSP3: Fragmentación Regional - Representa un futuro en el que prevalecen los intereses nacionales y regionales sobre la cooperación global. Se caracteriza por un crecimiento económico desigual, altos niveles de desigualdad y una falta de esfuerzos internacionales para abordar el cambio climático (IPCC, 2021).
- SSP4: Desigualdad Sostenida - Describe un futuro en el que hay un crecimiento económico alto pero desigual, con un enfoque en la maximización del bienestar económico y una falta de atención a la sostenibilidad ambiental (IPCC, 2021).
- SSP5: Desarrollo Fósil Dependiente - Representa un futuro en el que prevalece la dependencia continua de los combustibles fósiles y las tecnologías convencionales. Se caracteriza por un crecimiento económico alto, altos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero y escasas medidas de mitigación del cambio climático (IPCC, 2021).

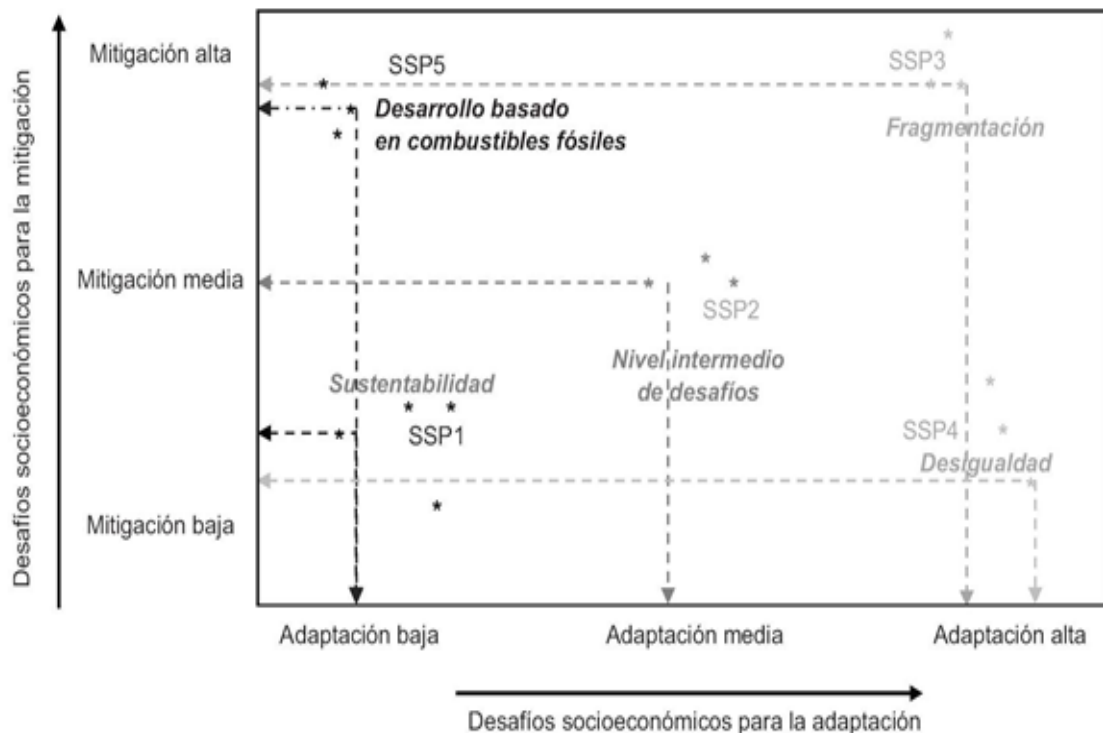


Figura 3: Escenarios de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP)

FUENTE: Escoto *et al.* (2017)

En el sexto informe del proyecto intercomparación de modelos acoplados (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 - CMIP6) se planteó que los SSP se combinarán con los RCP para cubrir el aspecto tanto ambiental, como social que pueden afectar el clima en un futuro (IPCC, 2021).

2.13. Modelos hidrológicos

Se define por modelo a la representación simplificada de un sistema del mundo real. Los modelos hidrológicos intentan representar los diferentes procesos que se dan dentro de un espacio (generalmente una cuenca) y que transforman, en principio, la precipitación en escorrentía (Pascual y Díaz, 2016).

Los métodos y técnicas de medición de caudal y precipitación han evolucionado en el tiempo. Sin embargo, en los procesos de la infiltración, percolación, el flujo subsuperficial y flujo subterráneo son medidos usualmente de manera indirecta y/o remota debido a que se presentan bajo el suelo, lo que conlleva a una fuerte incertidumbre respecto al funcionamiento del ciclo hidrológico (Cabrera, 2017).

Se pueden clasificar de múltiples maneras, teniendo en cuenta criterios como el enfoque matemático que realizan, el grado de representación espacial de sus componentes, etc. (Figura 14). Si bien es cierto que en la mayoría de los casos los modelos se describen por la forma o detalle que tienen de representar la superficie de la cuenca (agregados, semidistribuidos y distribuidos), el enfoque matemático (determinista y estocástico) y la forma de plantear los procesos hidrológicos que analiza (de base física) (Pascual y Díaz, 2016).

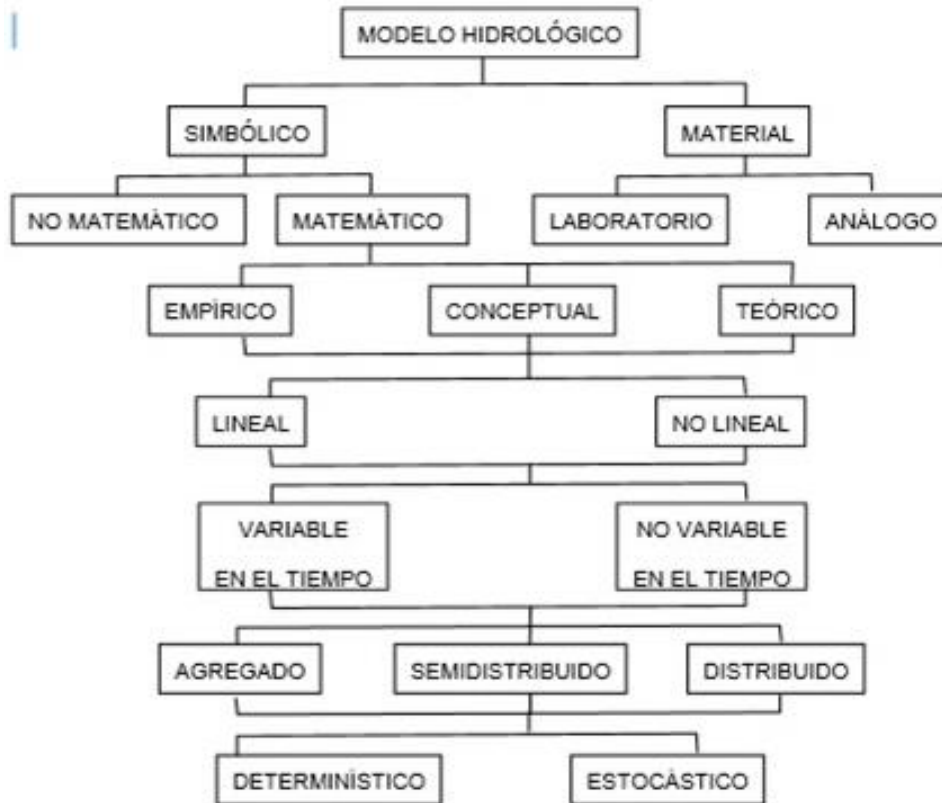


Figura 4: Clasificación de los modelos hidrológico

FUENTE: Pascual y Díaz (2016)

Un modelo es agregado cuando, independientemente de los procesos que considere, los parametriza como valores únicos para el conjunto de la cuenca, sin tener en cuenta su diversidad espacial (Figura 15). Se considera distribuido al modelo que intenta representar con el mayor detalle dichos procesos y parámetros. El modelo semidistribuido es aquel que da una representación intermedia de la diversidad espacial, utilizando zonas de comportamiento teóricamente similar que se consideran como agregadas (Pascual y Díaz, 2016).

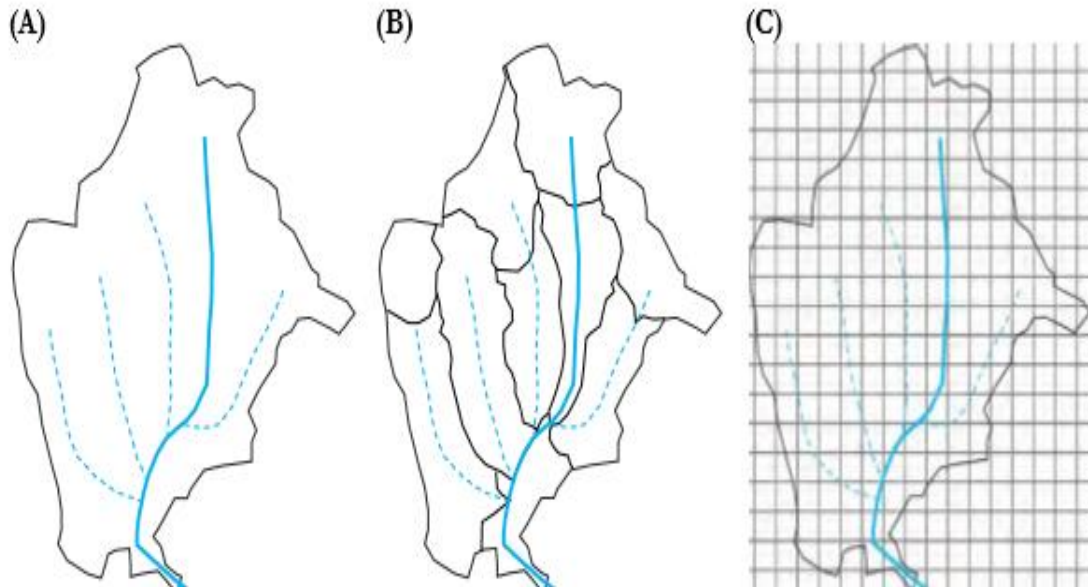


Figura 5: Modelo de tipo agregado (A), semidistribuido (B) y distribuido (C)

FUENTE: Pascual y Díaz (2016)

Un modelo estocástico tiene salidas que son, por lo menos, parcialmente aleatorias y se usa cuando esta variación es grande. Los determinísticos no consideran aleatoriedad, en la formulación matemática una entrada dada produce siempre una misma salida (Fattorelli y Fernández, 2011).

2.14. Modelo GR2m

El modelo GR2m es un modelo agregado que funciona a paso de tiempo mensual y fue propuesto para reconstruir caudales a partir de precipitación y evapotranspiración, con el objetivo de ser aplicado a nivel de presas y bordos de almacenamiento, asimismo para planeamiento agrícola. La estructura de este modelo consta de dos reservorios y se describe a continuación: el reservorio-suelo que corresponde a la función de producción; y el reservorio de agua gravitacional, donde el aporte es instantáneo al inicio y después con el paso del tiempo se vacía gradualmente (Cabrera, 2013). El nivel de este reservorio determina el caudal que puede liberar.

En la Figura 6 se representa a la precipitación media de la cuenca como P , $P1$ es la escorrentía superficial, E es a evapotranspiración actual, $P2$ la percolación profunda, S el almacenamiento del depósito de suelo al inicio del periodo de análisis, R el almacenamiento del depósito de agua gravitacional al inicio del periodo de análisis y Q el caudal a la salida

de la cuenca. La capacidad máxima de almacenamiento del depósito de suelo es X_1 y la del depósito gravitacional se asume de 60mm.

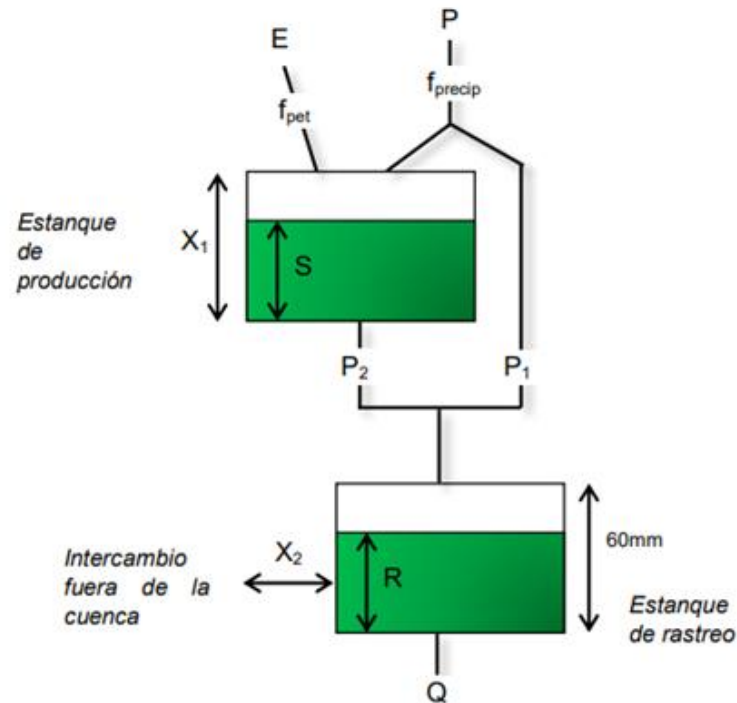


Figura 6: Esquema del Modelo GR2M

FUENTE: Mouelhi (2003) y Mouelhi (2006)

2.15. Análisis de consistencia

La evaluación de consistencia es el procedimiento destinado para reconocer o detectar, describir y corregir la falta de uniformidad e inconsistencia en una secuencia temporal (Villón, 2002).

El enfoque del método de vector regional se centra en tres funciones específicas: la evaluación crítica de datos, la homogeneización y la expansión o completitud de los datos de precipitación. Su premisa fundamental radica en la suposición de que, dentro de una misma región climática sujeta a un régimen de precipitaciones uniforme, los totales anuales de precipitación son pseudo-proporcionales, con variaciones aleatorias mínimas cada año debido a la distribución de las lluvias en la zona (Espinoza, 2005).

La metodología básica del Método Vector Regional consiste en crear una estación ficticia que represente un promedio ponderado de todas las estaciones en la zona, en lugar de comparar directamente estaciones individuales mediante correlaciones o gráficos de doble masa, como se hace en métodos convencionales. Para calcular esta estación "vector", el MVR utiliza el concepto de precipitación media extendida al período de estudio, superando así los desafíos relacionados con el peso desigual de estaciones más húmedas sobre las menos húmedas (como ocurre con un promedio simple) y la presencia de datos faltantes o periodos de operación diferentes entre estaciones (que podrían distorsionar promedios basados en años húmedos o secos exclusivamente). Esto evita obtener valores de precipitación estandarizados o centrados que podrían estar sesgados (Espinoza, 2005).

Bajo estos conceptos, se emplea el método de Mínimos Cuadrados para encontrar los Índices Pluviométricos Regionales Anuales “ Z_i ” y la Precipitación Media Extendida “ P_j ”. Esto se logra al minimizar la sumatoria de la expresión

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left(\frac{P_{ij}}{P_i} - Z_i \right)^2$$

Donde:

i es el índice de año, j el índice de estación, N el número de años y M el número de estaciones. P_{ij} es la precipitación anual en la estación j el año i , P_j es la precipitación media extendida al período de N años y finalmente Z_i es el índice pluviométrico regional del año i . La resolución del problema es difícil, debido al hecho que ciertos P_{ij} no fueron observados y faltan (Espinoza, 2005).

2.16. Índices estadísticos

2.16.1. Índice de eficiencia de Nash (NSE)

Es uno de los criterios más utilizados en el análisis comparativo de calibración y validación de modelos hidrológicos, es adimensional con una escala de intervalo de $[-\alpha$ hasta 1] indicando el rendimiento del modelo, siendo un ajuste perfecto entre observación y simulación cuando alcanza el valor de 1. El criterio de NSE resulta de la normalización del

criterio de error cuadrático medio, mostrando el rendimiento del modelo hidrológico en comparación con un modelo lineal de base (media de las observaciones) (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009; Nash & Sutcliffe, 1970).

La eficiencia de Nash, como definida por Nash & Sutcliffe (1970), se calcula utilizando la ecuación, donde Q_Y representa el caudal simulado, Q_X es el caudal observado, y \bar{Q}_X es el caudal medio observado.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m [Q_{X,j} - Q_{Y,j}]^2}{\sum_{j=1}^m [Q_{X,j} - \bar{Q}_X]^2}$$

2.16.2. Coeficiente de correlación de Pearson

La correlación se refiere a la conexión causal o no entre dos variables, que puede ser lineal o proporcional, y es valiosa para predecir relaciones. Un valor de +1 sugiere una relación funcional perfecta, lo que significa una dependencia total entre las dos variables, conocida como relación directa.

Si el valor es -1, se trata de una correlación negativa perfecta, lo que señala una dependencia total entre las dos variables conocidas como relación inversa.

La fórmula para calcular el coeficiente de correlación de Pearson se presenta de la siguiente manera, donde $Cov_{(x,y)}$ representa la covarianza entre los valores x e y , $\sigma_{(x)}$ es la desviación estándar de x , y $\sigma_{(y)}$ es la desviación estándar de y .

$$C.P(x, y) = \frac{Cov_{xy}}{\delta_x \delta_y}$$

2.16.3. Índice de eficiencia Kling-Gupta KGE

Es una medida alternativa de comparación que se desarrolla al calcular la distancia euclidiana entre los componentes que representan la correlación, el sesgo y una medida de variabilidad, desde un punto ideal. Este punto ideal equivale a la selección desde el frente tridimensional de Pareto, según (Gupta, *et al*, 2009)

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

$$r = \text{correlacion}(QX, QY)$$

$$\alpha = \frac{sd(QY)}{sd(QX)}$$

$$\beta = \frac{\overline{QY}}{\overline{QX}}$$

La fórmula para calcular la métrica de KGE incluye los siguientes términos: r es el coeficiente de correlación, α representa la ratio de varianza (sd es la desviación estándar) y β es el bias ratio. Q_x indica el caudal observado y Q_y el caudal simulado.

III. DESARROLLO DE TRABAJO

3.1. Generalidades

La variabilidad climática es la fluctuación de las condiciones predominantes de una zona, por otro lado, el cambio climático es la modificación de esas condiciones predominantes alrededor de la cual oscilan esas condiciones.

Los estudios de cambio climático actualmente están cobrando relevancia debido al cambio cada vez más notorio en la variabilidad climática. A pesar de ello, en el país aún no hay muchos estudios del impacto de cambio climático en la disponibilidad hídrica según Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 y generalmente no se consideran los efectos del cambio climático en los estudios hidrológicos de los Estudios de Impacto Ambiental (EIA). En ese sentido, el tópico del estudio denominado “IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SUPERFICIAL DE LA SUBCUENCA ALTO HUARMEY” es muy poco estudiado y aplicado.

Como parte de mis actividades desarrollé el estudio de “IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA SUPERFICIAL DE LA SUBCUENCA ALTO HUARMEY” como parte de un estudio hidrológico complementario de la línea física del Estudio de Impacto Ambiental para una unidad minera en la región de Ancash bajo el servicio de consultoría.

Mi formación profesional me brindó conocimientos de hidrología, sistemas de información geográfica y estadística que, sumados a mi experiencia laboral, me permitió consolidar mis conocimientos previos, así como adquirir conocimiento sobre la gestión de recursos hídricos, lenguaje de programación, estadística no paramétrica y cambio climático. En consecuencia, me permitieron aportar con conocimientos sólidos de recursos hídricos y dominio de programas informáticos competentes para desarrollar mejores estudios hidrológicos considerando proyecciones de cambio climático.

3.2. Descripción del área de estudio

La cuenca del río Huarmey se localiza entre los paralelos $10^{\circ}11'10''$ y $9^{\circ}37'46''$ de Latitud Sur y los meridianos $78^{\circ}10'49''$ y $7^{\circ}27'12''$ de Longitud Oeste. Así mismo, la cuenca del río Huarmey varía altitudinalmente de los 4950 m.s.n.m. a los 0 m.s.n.m. en su desembocadura al mar. El área de estudio comprende la subcuenca Alto Huarmey, esta es una subcuenca húmeda con extensión de 229.0 km² cuyo cauce principal recorre 21.822 km con una pendiente de 5.3% desde sus nacientes a 4445 m.s.n.m. hasta que se une por la margen derecha con el río Allma a 2789 m.s.n.m. De la unión del río Allma y el río La Merced nace el río Aija. Su recorrido comienza en la quebrada Tuctu y continúa por ríos Huachón y La Merced. Hidrográficamente, se ubica en la parte alta de la cuenca del río Huarmey y limita con las microcuencas Medio Alto Huarmey y Allma (Figura 7).

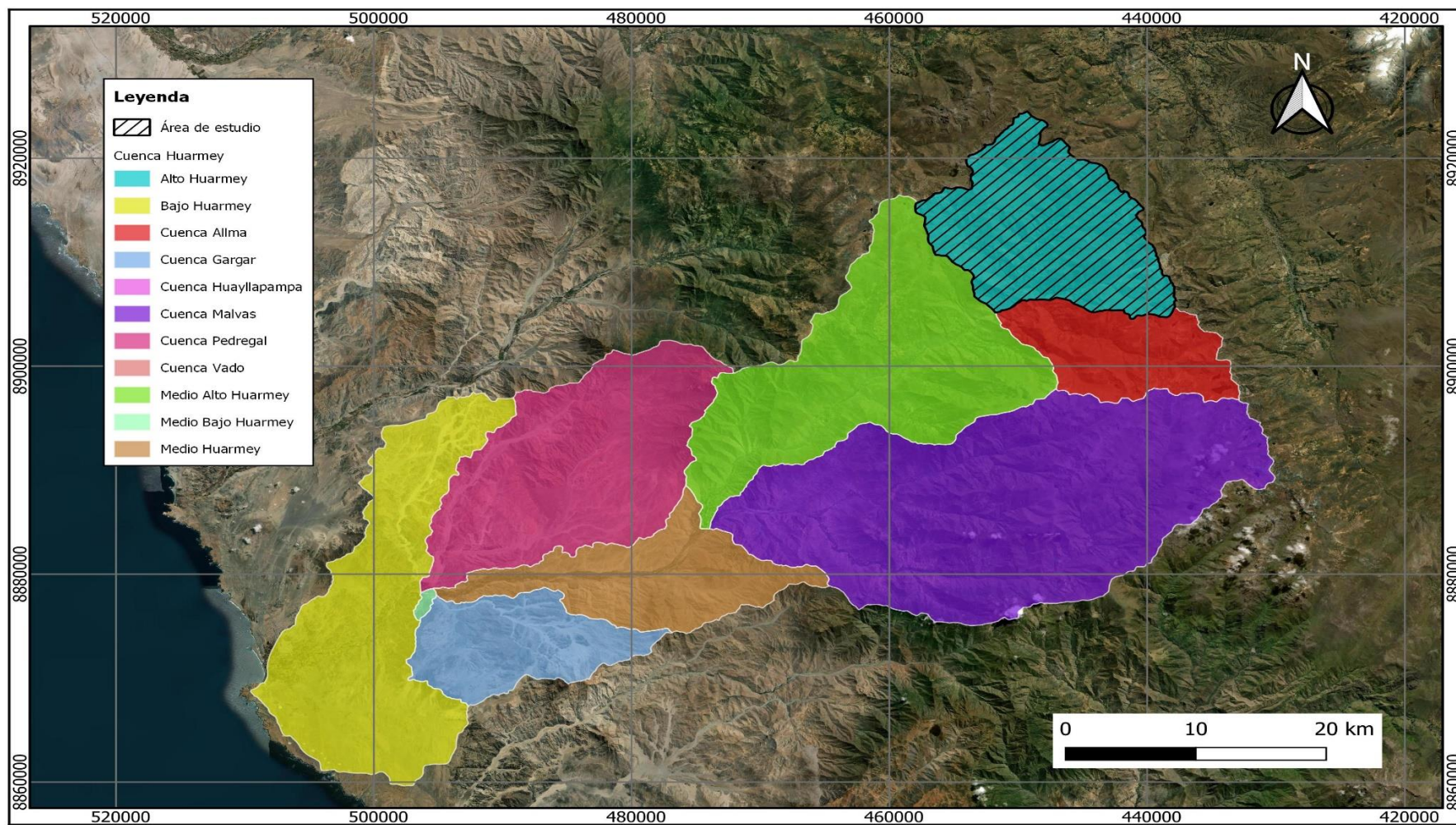


Figura 7: Subcuencas de la cuenca del río Huarmey

3.3. Materiales y equipos

Los materiales que se empleó en la elaboración del trabajo son los siguientes:

- Imágenes satelitales de ASTER GDEM de 30 x 30 metros obtenidas del portal del MINAM.
- Datos grillada de PISCO SENAMHI (precipitación y temperatura).
- Datos de precipitación, caudal y temperatura de SENAMHI y SNIRH ANA
- Datos de variables climática (precipitación y temperatura) histórica y pronóstico de escenarios de cambio climático del IPCC.

Los equipos y softwares que se usaron en la elaboracion del trabajo son los siguientes:

- *Hydraces*
- R studio
- Arcmap
- *HEC-GeoHMS*
- Ofimática (Excel, Word, Power Point, etc.)
- Laptop Windows Corel i7

3.4. Conceptualización de la metodología

En el presente trabajo se consideró distintos escenarios de evaluación para el análisis de la disponibilidad hídrica superficial (Figura 8). El escenario actual está comprendido desde el año 1984 al año 2014 y se estimaron los caudales mensuales con información histórica y observada de precipitación y temperatura media de SENAMHI. El escenario Futuro I comprende de 2015 al 2045 y escenario Futuro II comprende de 2046 al 2076; en ambos escenarios descritos se estimaron los caudales mensuales con la variable de precipitación y temperatura media de los modelos GCM bajo el escenario fatalista de SSP5-8.5 del CMIP6.

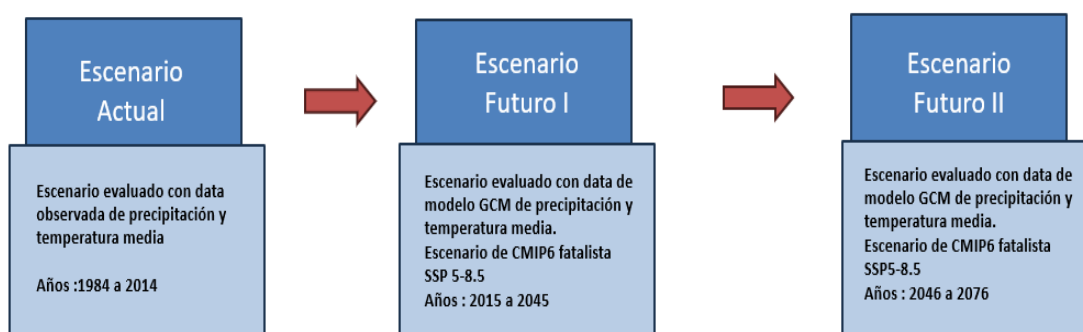


Figura 8: Escenarios de evaluación

La metodología empleada en el presente trabajo consistió en la delimitación del área de estudio, recopilación y procesamiento de información hidrometeorológica, ajuste del modelo hidrológico GR2m, selección del modelo de cambio climático GCM del CMIP6 y finalmente la estimación de los caudales mensuales para los escenarios de evaluación.

En la Figura 9 se presenta un diagrama de flujo de la metodología desarrollada en el trabajo.

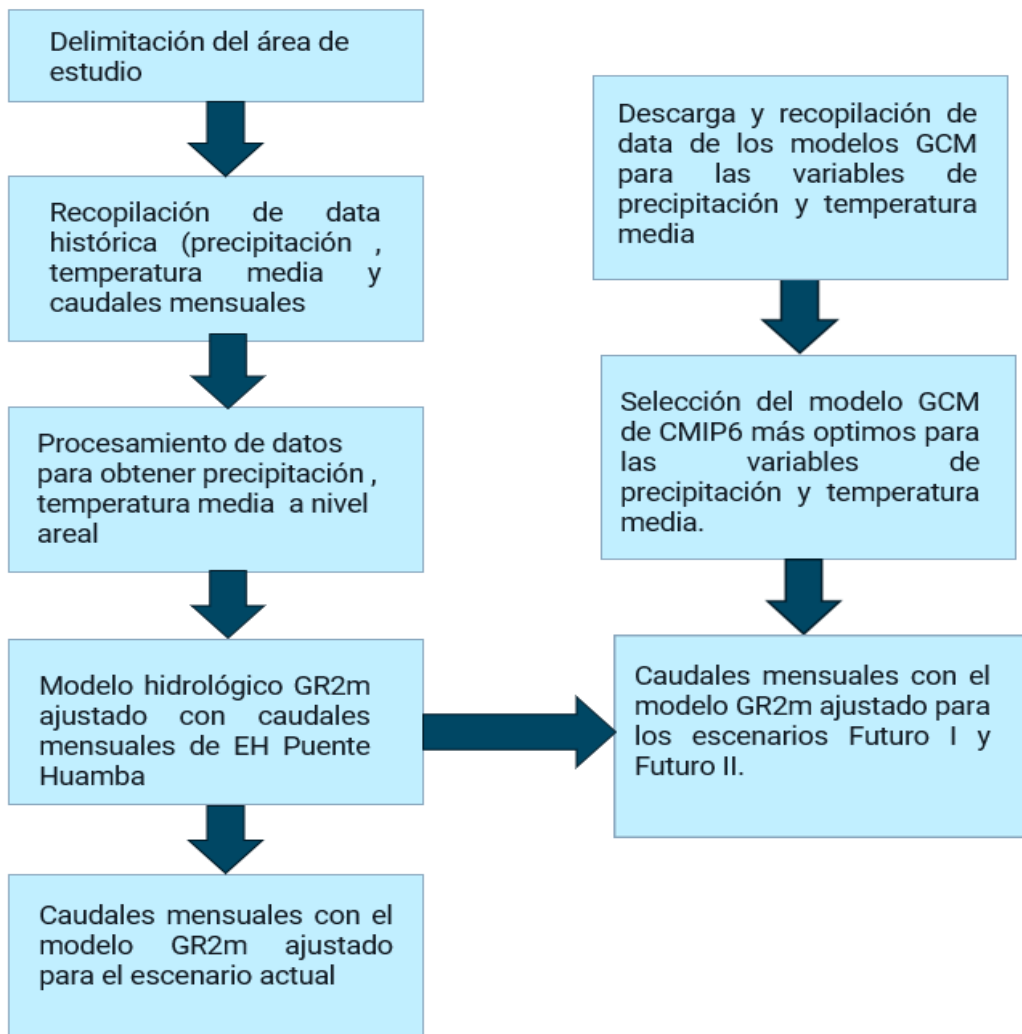


Figura 9: Diagrama de flujo de la metodología

3.5. Delimitación de la subcuenca Alto Huarmey

Las imágenes satelitales ASTER GDEM de 30 por 30 metros fueron utilizadas para delimitar. Este análisis se llevó a cabo utilizando el software ArcMap. La Figura 10 muestra la delimitación de la microcuenca alto Huarmey la delimitación de la cuenca Huarmey hasta punto de aforo Puente Huamba.

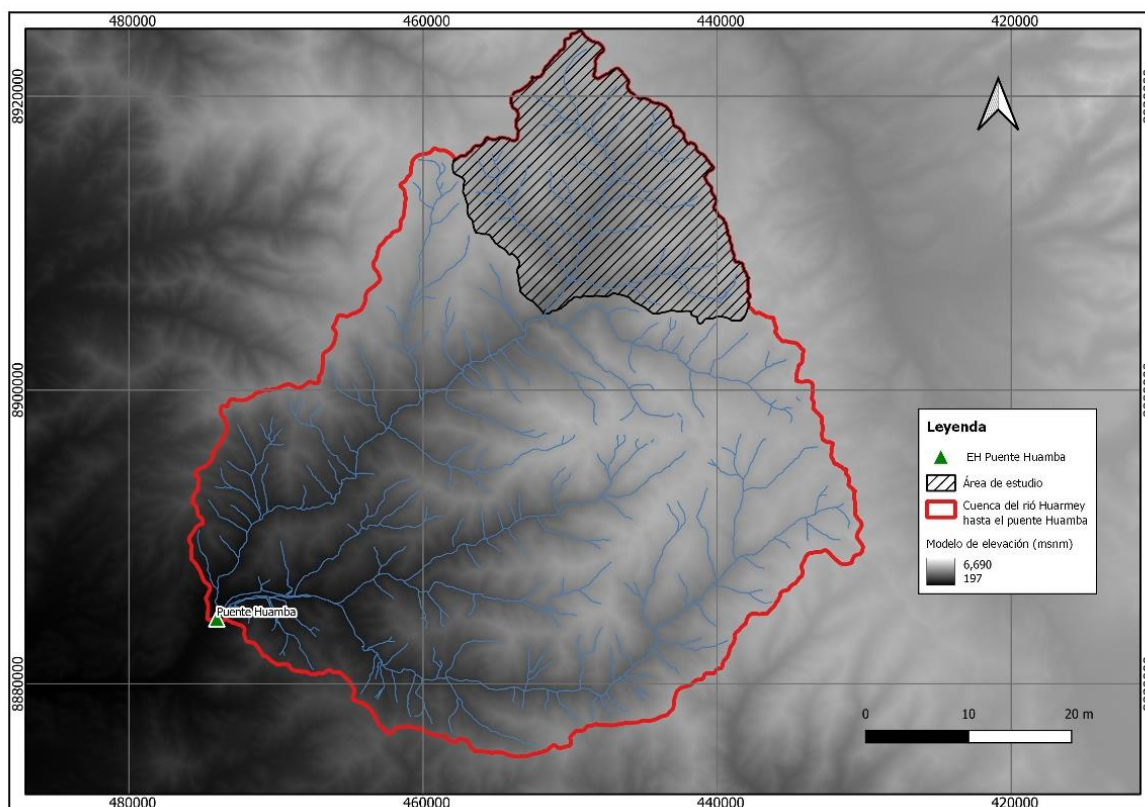


Figura 10: Cuenca de río Huarmey hasta el Puente Huamba

3.6. Recopilación de información hidrometeorológica

La información climática de precipitación (Pm) y temperatura media (T°m) fue obtenida de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la información hidrométrica de la estación hidrométrica del Puente Huamba también administrado por SENAMHI. En la Figura 11 se presentan las estaciones climáticas consideradas en el estudio. En la Tabla 1 se presenta la relación de las estaciones climáticas del área de estudio.

Tabla 1: Lista de estaciones climáticas del área de estudio

Nombre de estación	Parámetro y Años de registro	Tipo de estación
Aija	Pm (2000-2014) y T°m (2000-2014)	climática
Cajamarquilla	Pm (1984-2014) y T°m (1984-2014)	climática
Malvas	Pm (1984-2014) y T°m (2004-2014)	climática
Milpo	Pm (1984-2014)	climática
Recuay	Pm (1984-2014) y T°m (1990-2014)	climática

Nota:

Pm: Precipitación media

T°m: Temperatura media

Adicionalmente, se empleó el registro histórico de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación media de producto grillado de PISCO SENAMHI para completar el registro de escenario actual (1984-2014).

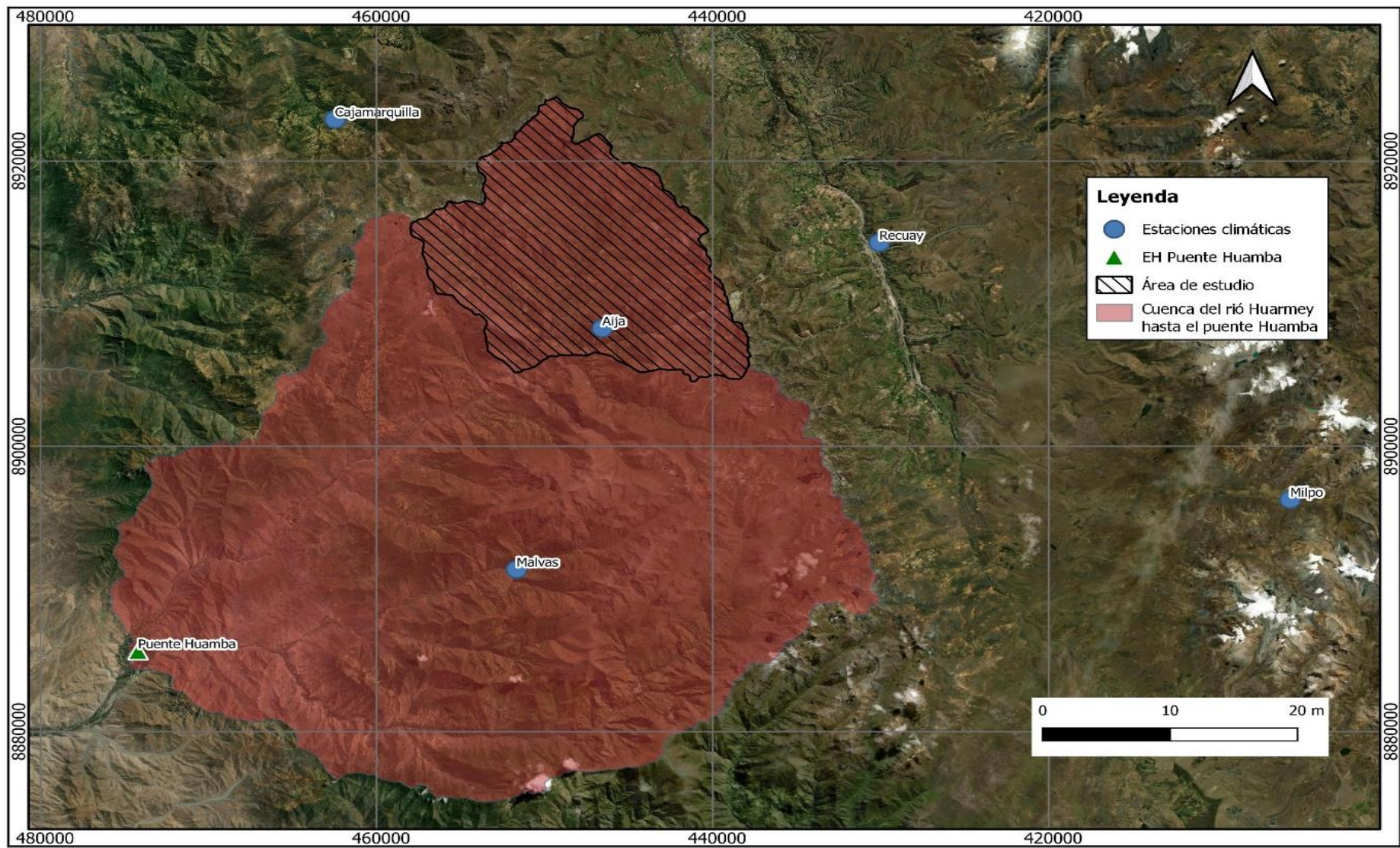


Figura 11: Estaciones climáticas de la Cuenca de Huarney hasta el Puente Huamba

3.7. Procesamiento de datos hidrometeorológicos

Con el fin de completar y extender el registro histórico de las estaciones climáticas para el periodo de 1984 a 2014 se utilizó el producto grillado de PISCO SENAMHI descargando la información con la ubicación de las estaciones de la Tabla 1. Luego se aplicó la metodología de downscaling para ajustar la información grillada por PISCO SENAMHI con la información observada.

La Figura 12 muestra el registro de la temperatura media de la estación Aija PISCO y el registro de la temperatura de la estación Aija Downscaling, donde se puede observar que la información fue escalada.

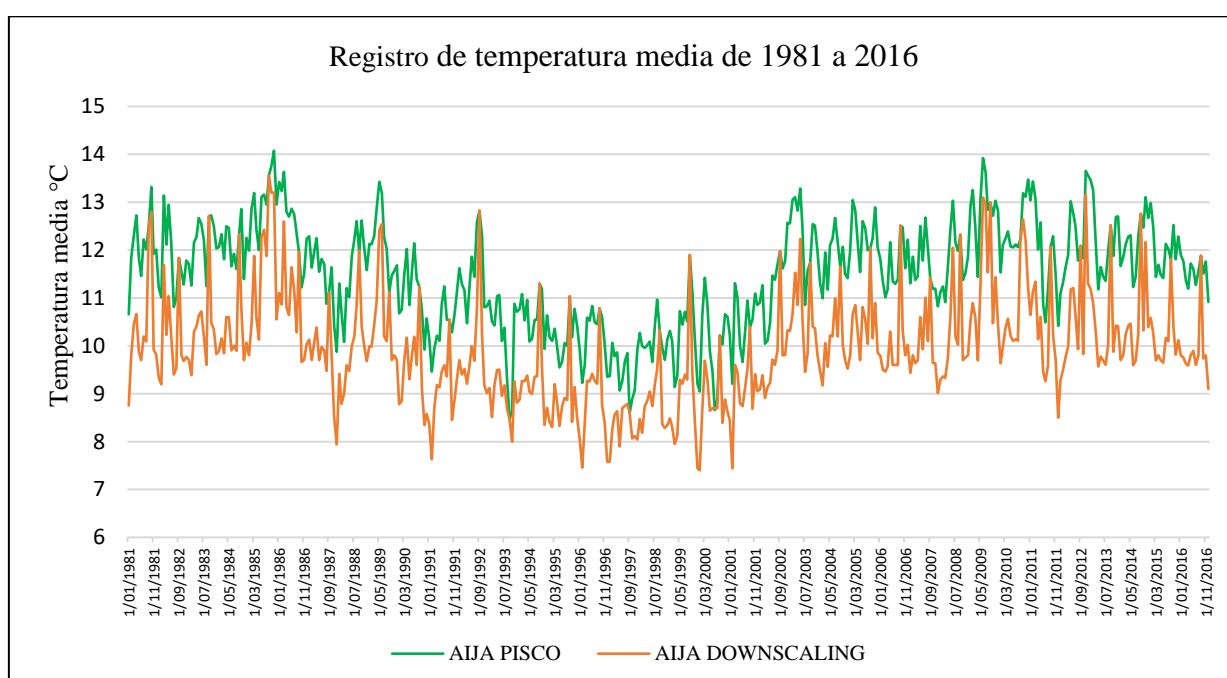


Figura 12: Comparación de datos de temperatura mensual con metodología downscaling y datos PISCO de la estación Aija

La Figura 13 muestra el registro de la temperatura media de la estación Aija con información de SENAMHI y el registro de la temperatura media de la estación Aija Downscaling, logrando tener un registro completo de temperatura media de los años 1981 al 2016.

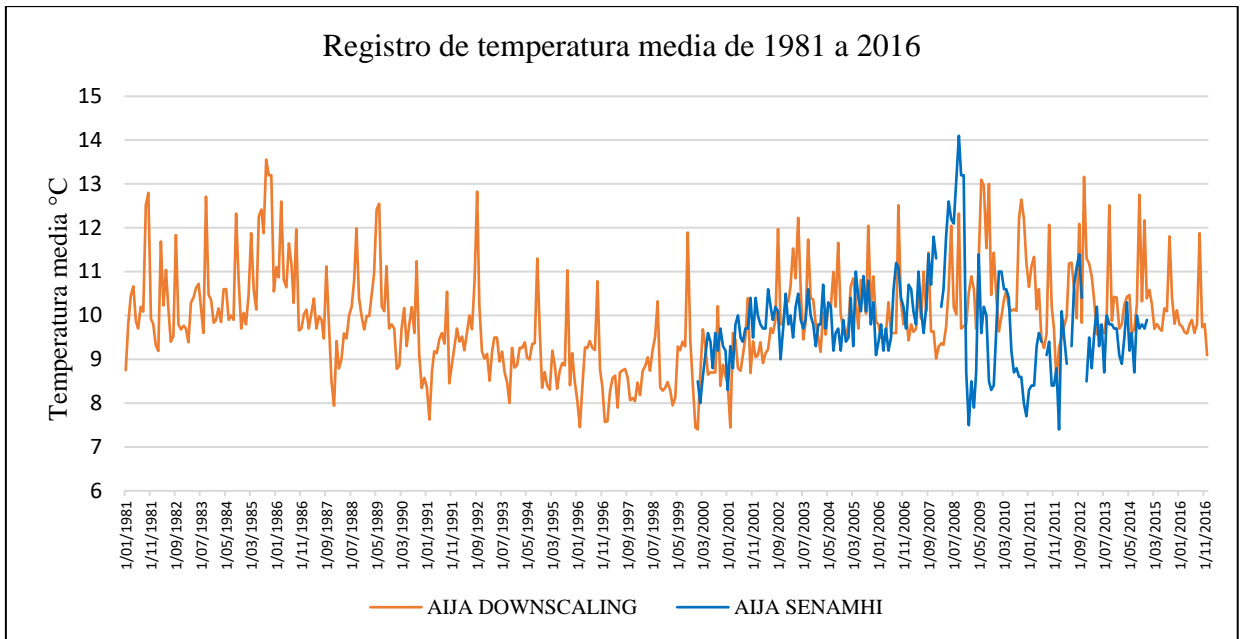


Figura 13: Comparación de datos de temperatura mensual con metodología *downscaling* y datos SENAMHI Aija

La Figura 14 muestra el registro de la temperatura media de la estación Malvas PISCO y el registro de la temperatura de la estación Aija Downscaling, donde se puede observar que la información fue escalada.

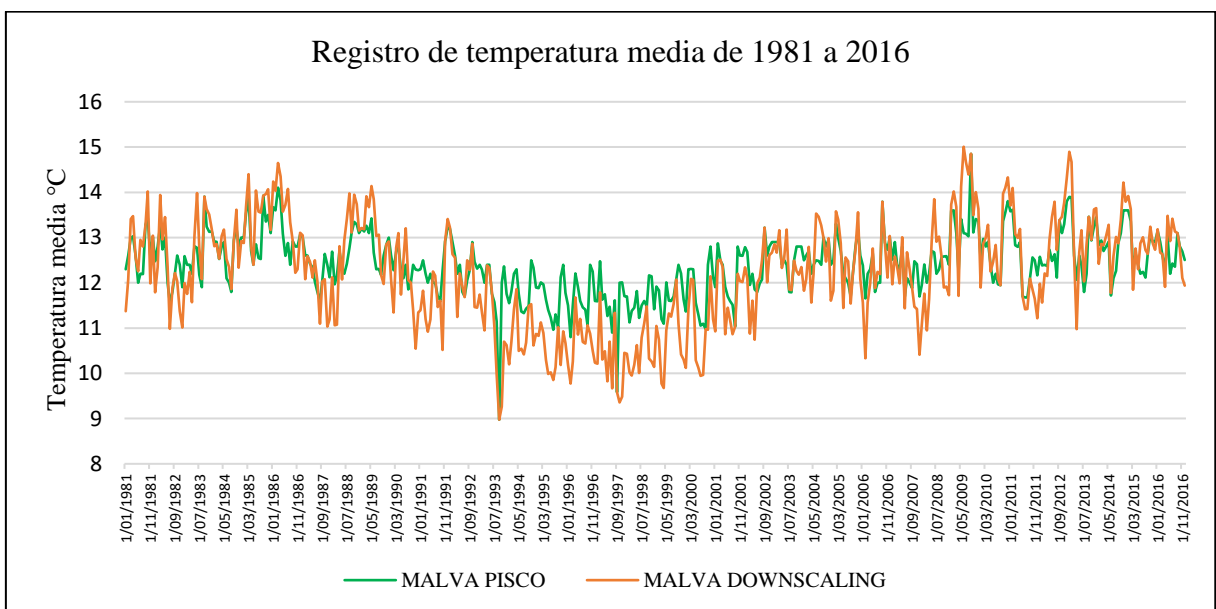


Figura 14: Comparación de datos de temperatura mensual con metodología *downscaling* y datos PISCO de la Estación Malvas

La Figura 15 muestra el registro de la temperatura media de la estación Malvas con información de SENAMHI y el registro de la temperatura media de la estación Aija Downscaling, logrando tener un registro completo de temperatura media de los años 1981 al 2016.

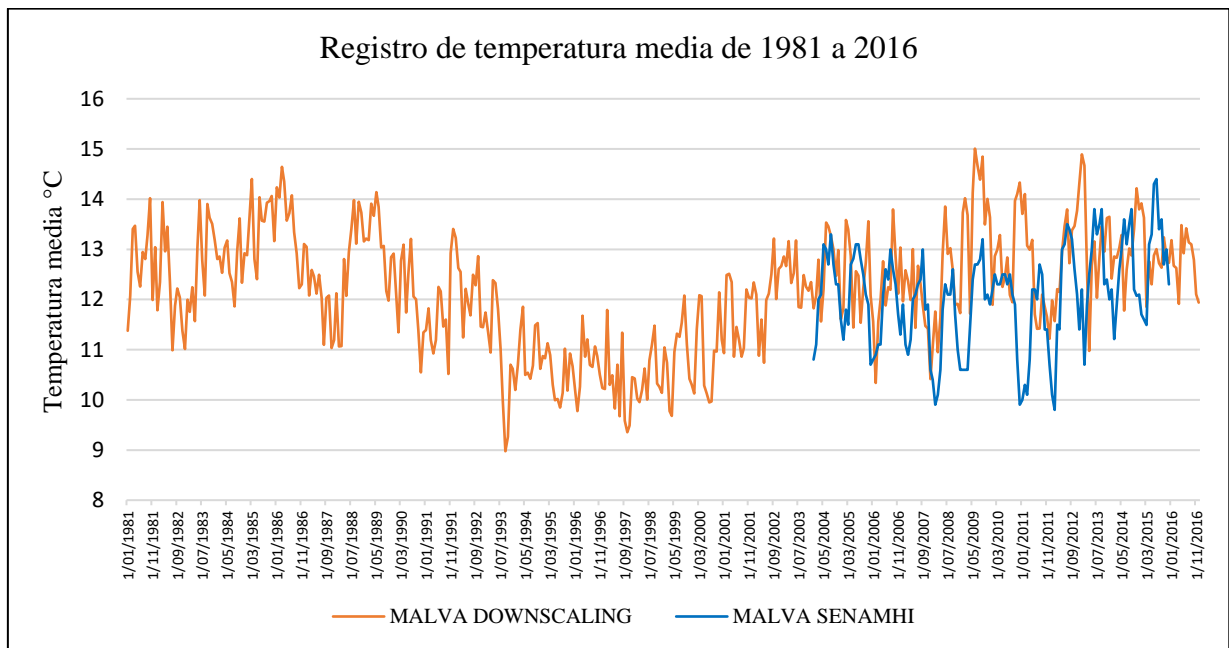


Figura 15: Comparación de datos de temperatura mensual con metodología *downscaling* y datos SENAMHI de la Estación Malvas

La Figura 16 muestra el registro de la temperatura media de la estación Recuay PISCO y el registro de la temperatura de la estación Recuay Downscaling, donde se puede observar que la información fue escalada.

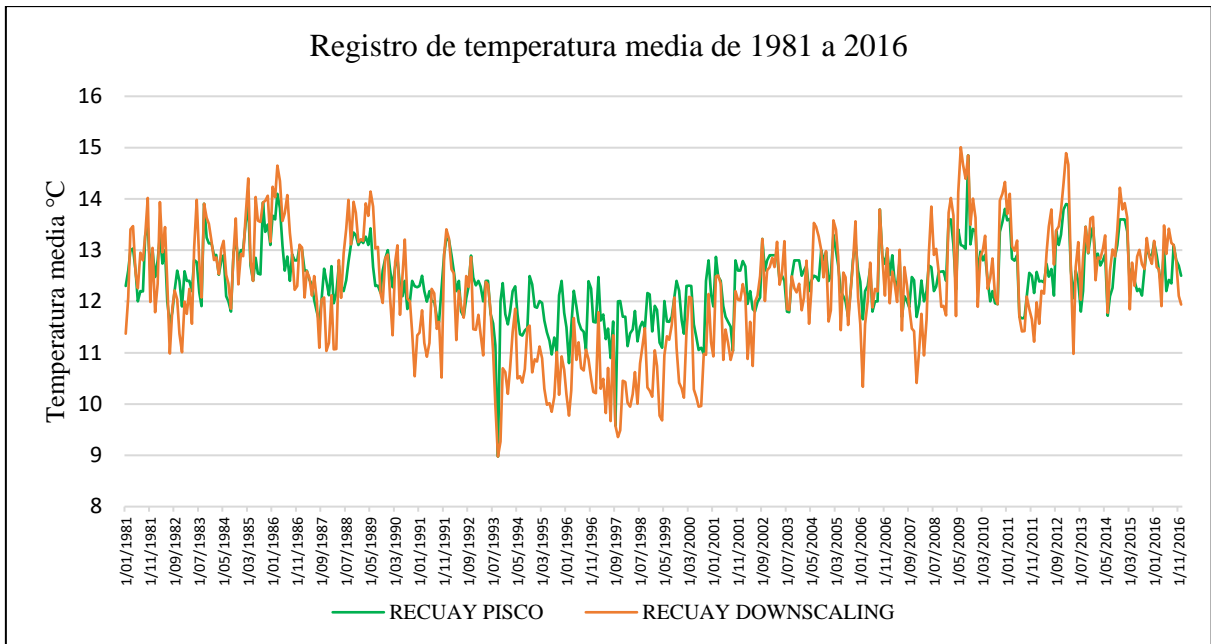


Figura 16: Comparación de datos de temperatura mensual con metodología *downscaling* y datos PISCO de la Estación Recuay

La Figura 17 muestra el registro de la temperatura media de la estación Recuay con datos de SENAMHI y el registro de la temperatura media de la estación Recuay Downscaling, logrando tener un registro completo de temperatura media de los años 1981 al 2016.

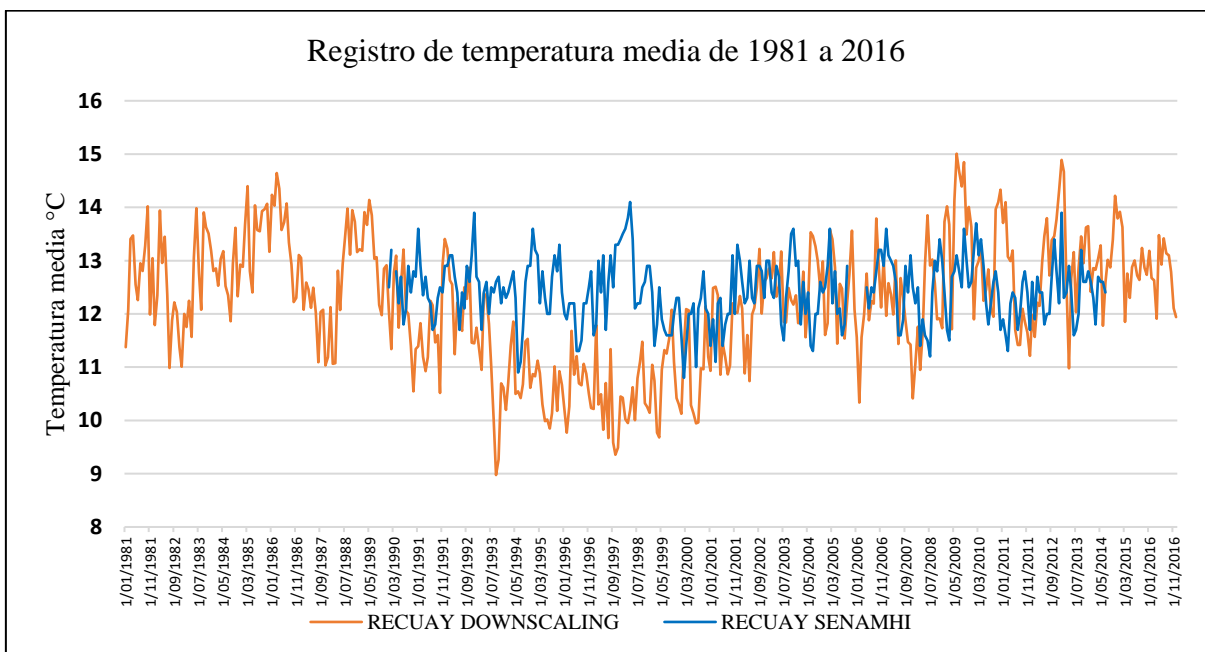


Figura 17: Comparación de datos de temperatura mensual con metodología *downscaling* y datos SENAMHI de la Estación Recuay

En la Figura 18 y Figura 19 se presentan el registro de precipitación promedio mensual y temperatura media mensual de las estaciones con el registro histórico de los años 1984 a 2014.

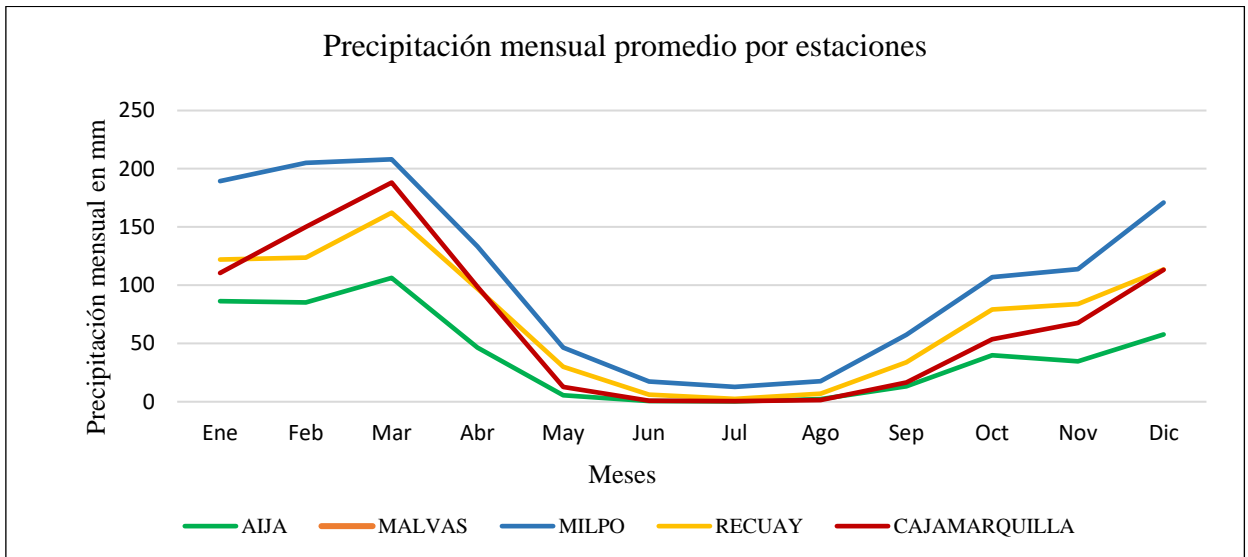


Figura 18: Precipitación promedio mensual de las estaciones

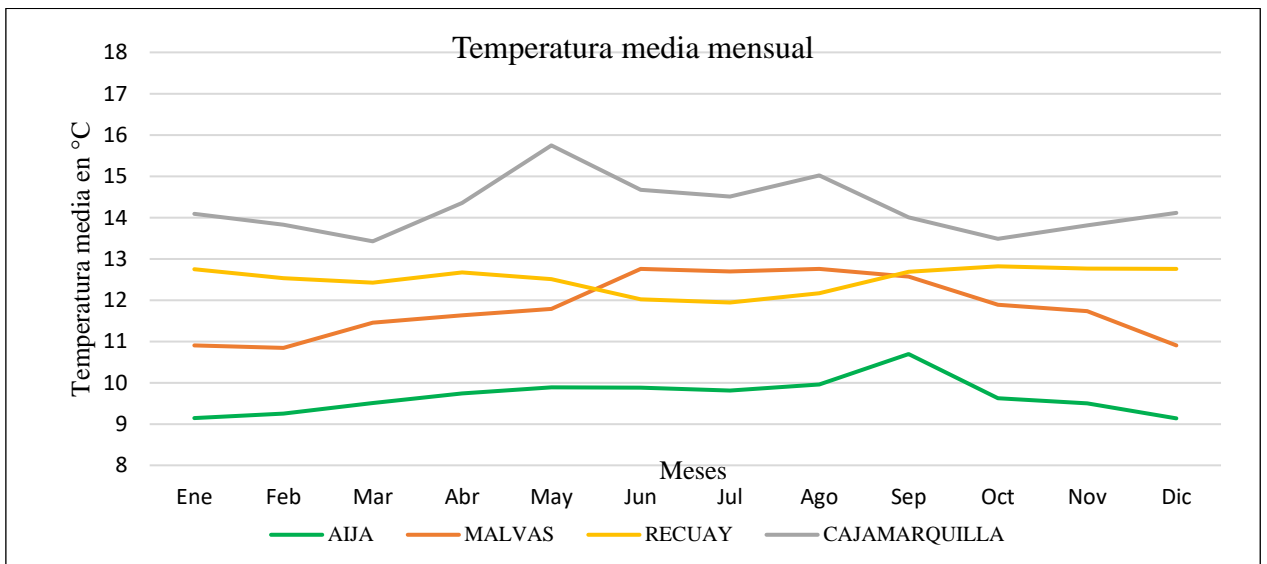


Figura 19: Temperatura media mensual de las estaciones climáticas

La precipitación mensual recopilada del registro multianual de las estaciones climática sirvió para determinar la precipitación a nivel mensual del área de estudio mediante isoyetas usando el software Hydracces (Vauchel, 2006) con la metodología de interpolación de kriging.

La temperatura media mensual recopilada del registro de las estaciones climáticas fue empleada para estimar la temperatura media areal con el software Hydracces siguiendo metodología de interpolación de kriging.

Luego la evapotranspiración potencial fue estimada a partir de la formulación de Thornthwaite y Mather (1957) con la temperatura media del área de estudio.

Finalmente se realizó un análisis de consistencia de los datos de las estaciones completas mediante el método del vector regional con el *software Hydracces*. En la Tabla 2 se muestran los coeficientes de correlación/ vector en todas las estaciones con valores mayores a 0.7 por lo que indican una buena correlación.

Tabla 2: Coeficientes de correlación

Estaciones	Correlación. /Vector
Aija	0.85
Malvas	0.84
Recuay	0.82
Cajamarquilla	0.77

3.8. Ajuste del modelo hidrológico GR2m

Para estimar los caudales, se utilizó el modelo lluvia-escorrentía GR2m, el cual opera a nivel mensual y se fundamenta en la relación entre la precipitación y la evapotranspiración para reconstruir los caudales (Cabrera, 2013).

Se ajustó el modelo hidrológico con la información de caudales de la estación hidrométrica Puente Huamba. La modelación hidrológica tiene por objetivo alcanzar la mayor exactitud posible, esto es, la cercanía entre los valores simulados y observados; se busca alcanzar este objetivo mediante ajustes en los parámetros.

La Figura 20 y Figura 21 muestran el registro histórico de la precipitación y temperatura media respectivamente que serán información de entrada para el modelo GR2m.

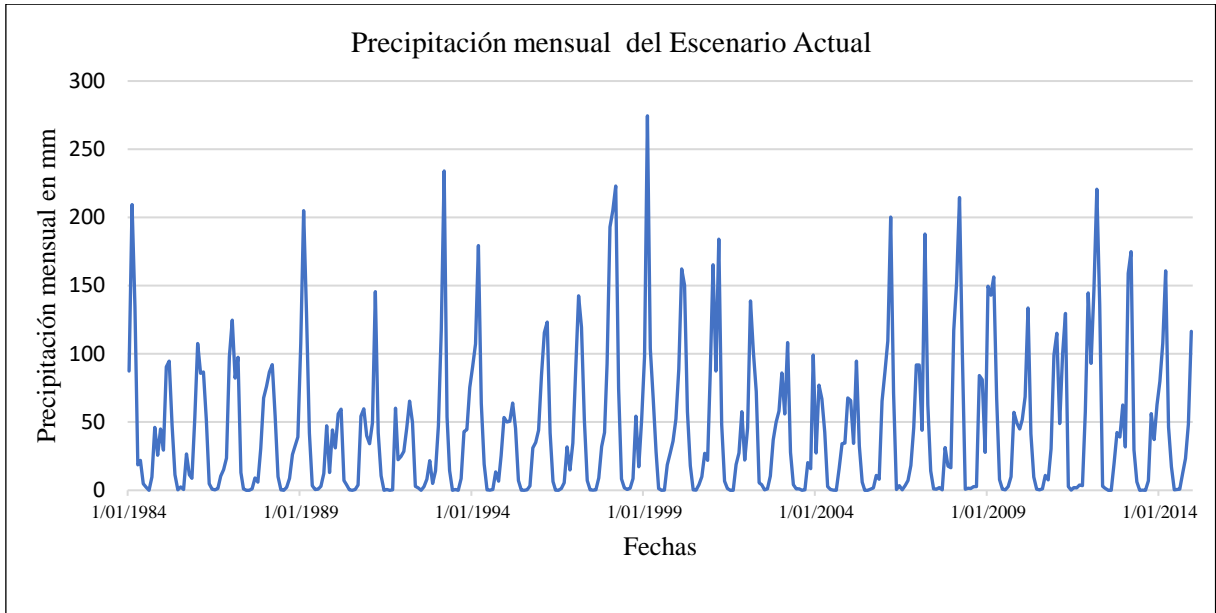


Figura 20 Precipitación media histórica del año 1984 al año 2014

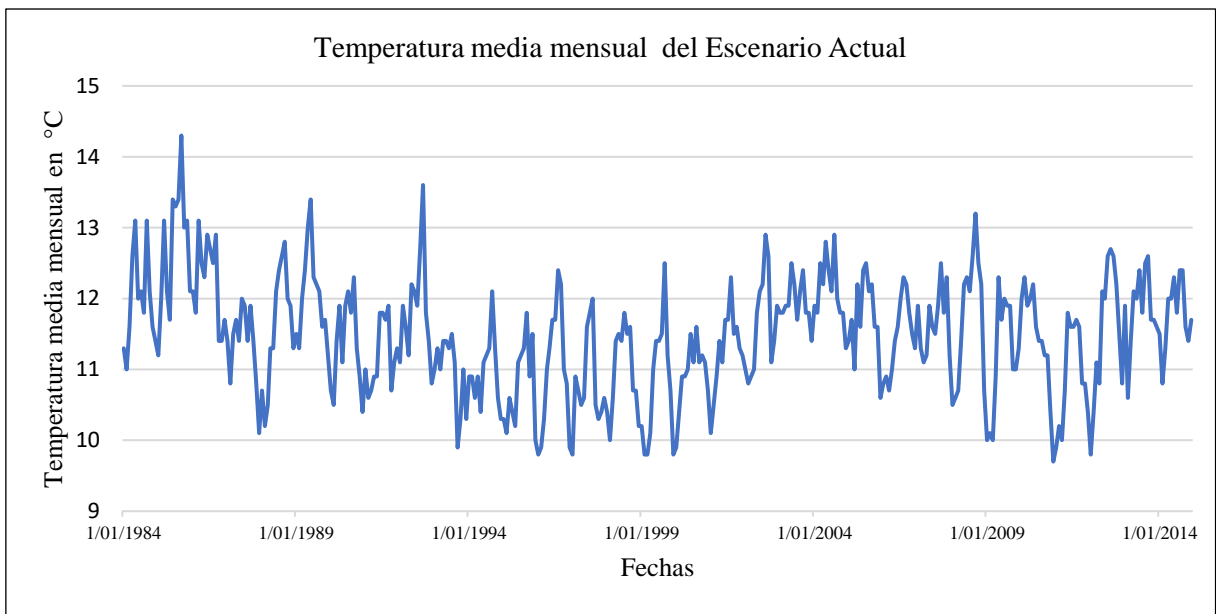


Figura 21 Temperatura media histórica del año 1984 al año 2014

Entre las distintas medidas de bondad de ajuste, el criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe es uno de lo más usados en hidrología. Se define como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Respecto a los resultados obtenibles a partir del criterio de Nash-Sutcliffe, algunos valores sugeridos son:

Tabla 3: Valores referenciales del Criterio de Nash-Sutcliffe

E	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

FUENTE: Molnar (2011)

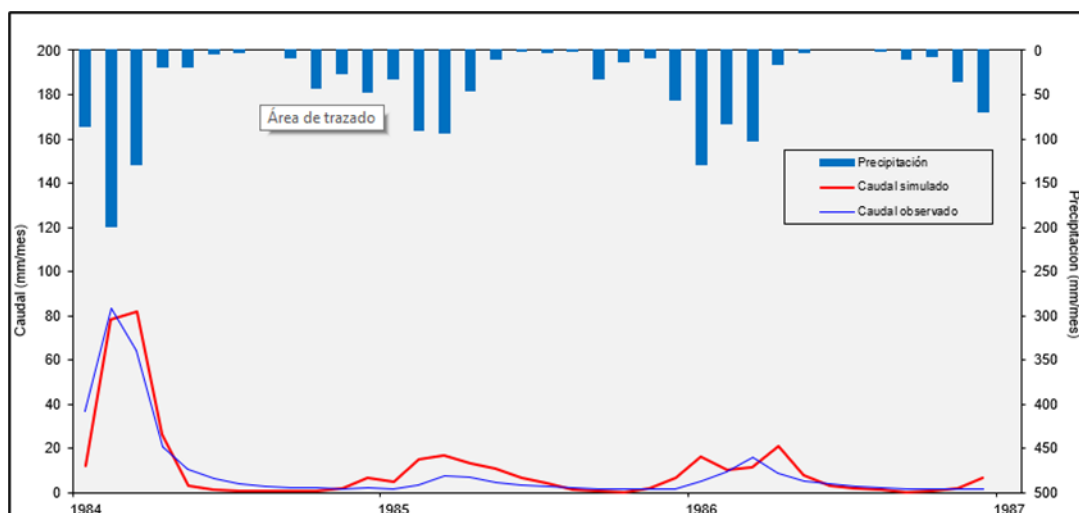


Figura 22: Caudales mensuales del año 1984 al año 1986 para el área de estudio

En la Figura 22 se muestran los caudales mensuales simulados y observados para con un Nash de 0.80 por lo cual se considera un excelente ajuste. En este proceso se determinó los parámetros X1 es 5.97 (capacidad de reservorio de producción) y X2 es 1.09 (parámetro de intercambio) ajustados.

Los parámetros ajustados permitieron estimar los caudales para el escenario actual del año 1984 al año 2014, el escenario futuro I (2015 al 2045) y el escenario futuro II (2046-2076); con el propósito de analizar la disponibilidad hídrica superficial en el área de estudio.

3.9. Selección del modelo de cambio climático de CMIP6

Los GCM utilizan datos sobre gases de efecto invernadero y aerosoles, tanto naturales como causados por la actividad humana, a través de modelos socioeconómicos. Estos modelos permiten prever cómo podrían comportarse los GEI y los aerosoles en el planeta, proporcionando proyecciones del sistema climático en el futuro (Oria *et al.*, 2013).

Con el fin de seleccionar el modelo de cambio climático GCM del CMIP 6 que mejor se ajusten al área de estudio se siguió los siguientes pasos:

3.9.1. Recopilación y preselección del GCM

Se recopiló las variables climáticas históricas (precipitación y temperatura media) de los Modelos Climáticos Globales (GCM) con información disponible. En el Anexo 1 Modelos GCM de la variable de temperatura media, se observa en la Figura 56 a la Figura 85 la información descargada de los modelos GCM. En el Anexo 2 Modelo GCM de la variable de precipitación media, se muestra en la Figura 86 a la Figura 116 de información descargada de los modelos GCM. La información de los 30 GCM para la precipitación mensual y los 30 GCM para la temperatura mensual fue comparada con el registro histórico (1984-2014) de la información observada con el fin de poder preseleccionar los modelos que presenten coincidencia cualitativa de la estacionalidad de las variables.

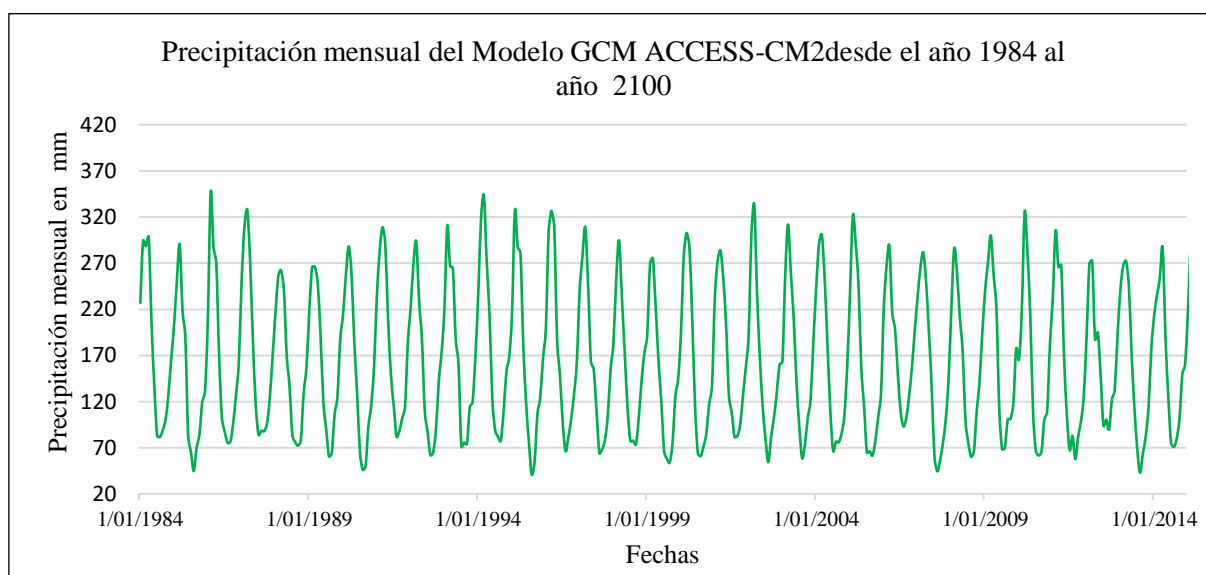


Figura 23: Datos descargados de precipitación del modelo GCM ACCESS-CM2

3.9.2. Reducción de escala de los GCM

Se empleó el método de reducción de escala estadístico, conocido como downscaling estadístico. El método Quantile-mapping es aplicado sobre esta base, ajustando los datos observados y los provenientes del GCM a la mixtura, con el objetivo de determinar los parámetros de la mixtura para ambas series, de donde, conociendo la función teórica, es posible estimar la probabilidad para cada valor de la serie, los mismos que son evaluados en la función cuantil de la serie observada, para finalmente obtener el valor de la serie corregida de temperatura y de precipitación.

Se escalaron los 31 modelos GCM disponibles para la variable de precipitación (Anexo 2). La Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27 y Figura 28 muestran el registro de la precipitación media escalada con la metodología de *Quantile Mapping* de algunos modelos GCM AWI-CM-1-1-MR, BCC-CSM2-MR, CNRM-ESM2-1 f2, HadGEM3-GC31-MM f3 y NESM respectivamente.

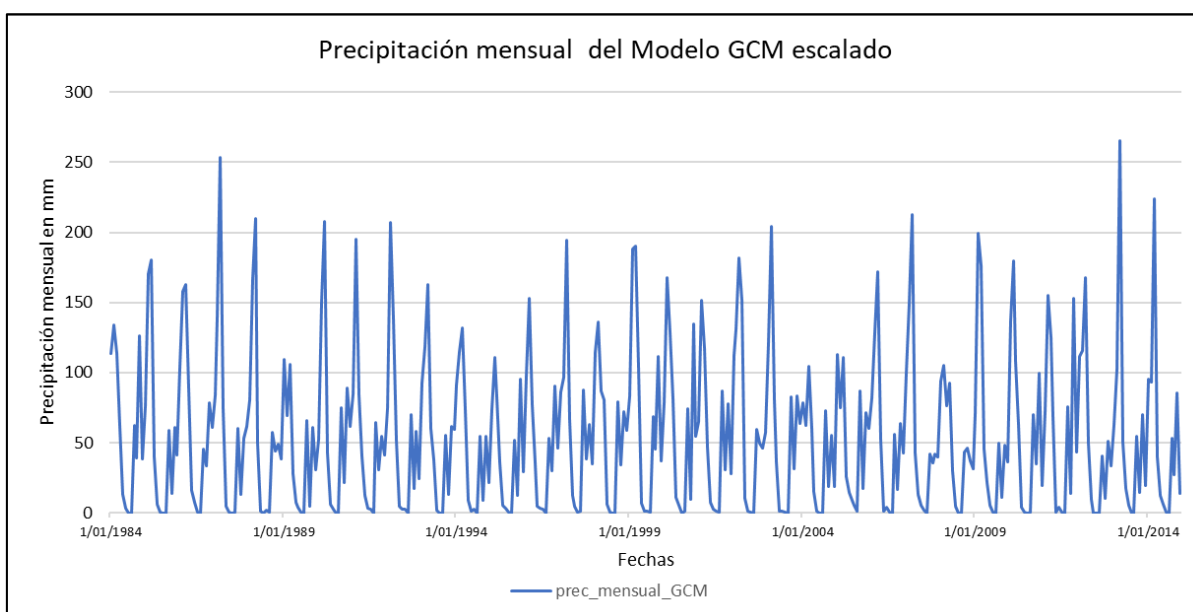


Figura 24: Reducción de escala de precipitación del modelo GCM AWI-CM-1-1-MR

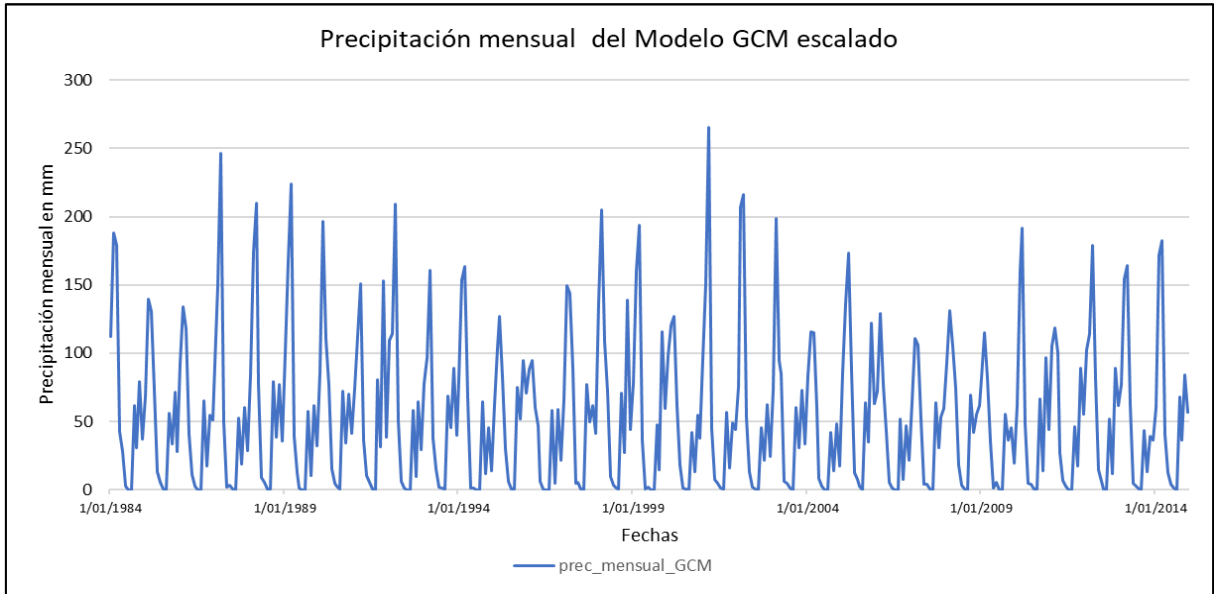


Figura 25: Reducción de escala de precipitación del modelo GCM BCC-CSM2-MR

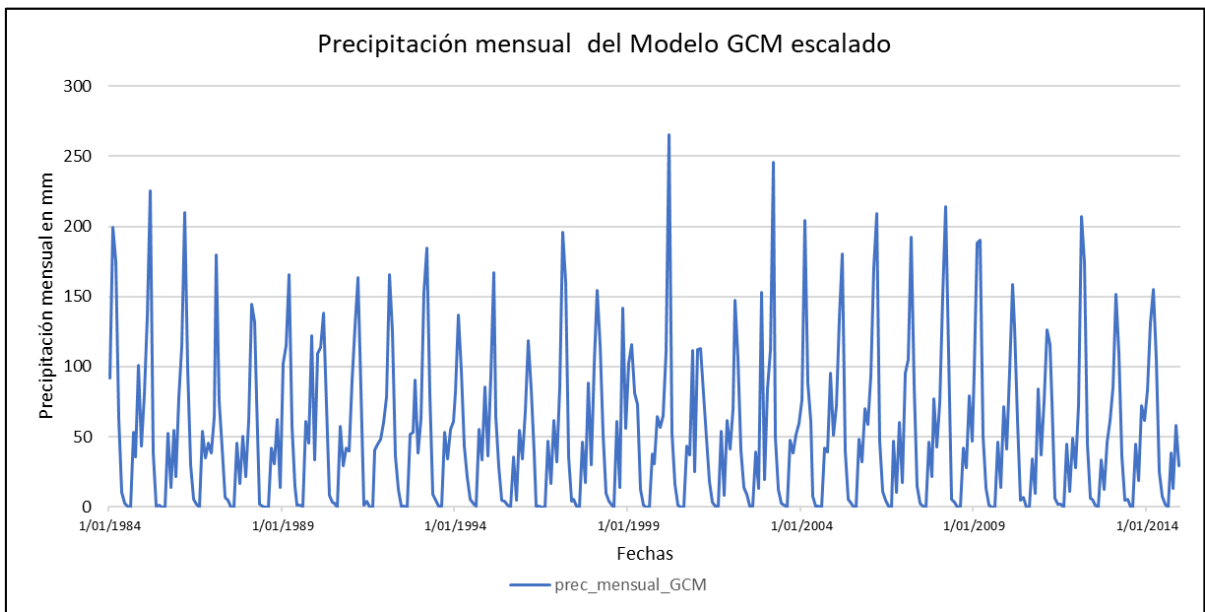


Figura 26: Reducción de escala de precipitación del modelo GCM CNRM-ESM2-1 f2

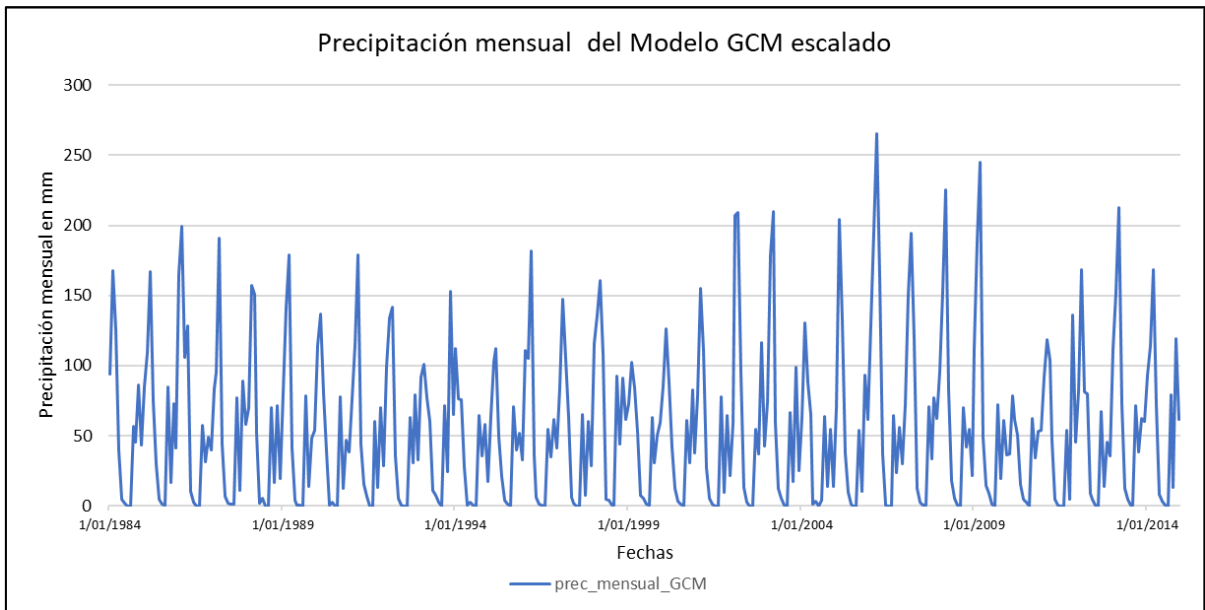


Figura 27: Reducción de escala de precipitación del modelo GCM HadGEM3-GC31-MM f3

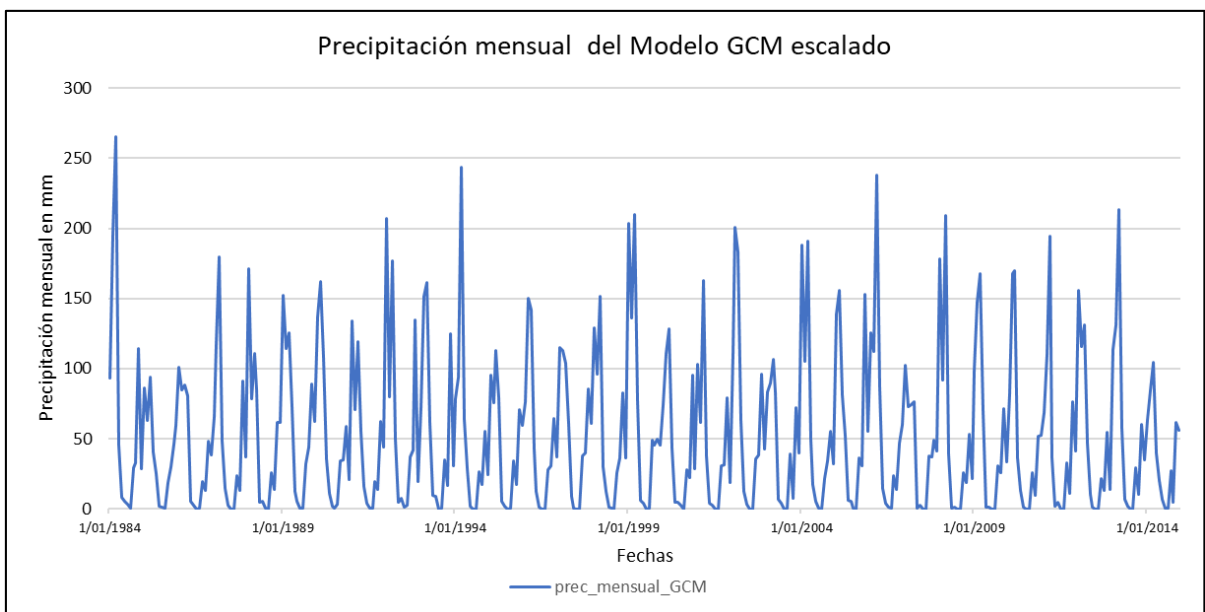


Figura 28: Reducción de escala de precipitación del modelo GCM NESM3

Se escalaron los 30 modelos GCM disponibles para la variable de temperatura media (Anexo 1). La Figura 29, Figura 30, Figura 31, y Figura 32 muestran el registro de la temperatura media escalada con la metodología de *Quantile Mapping* de algunos modelos GCM CNRM-ESM2-1 f2, MIROC6, MIROC-ES2L f2 y MRI-ESM2-0 respectivamente.

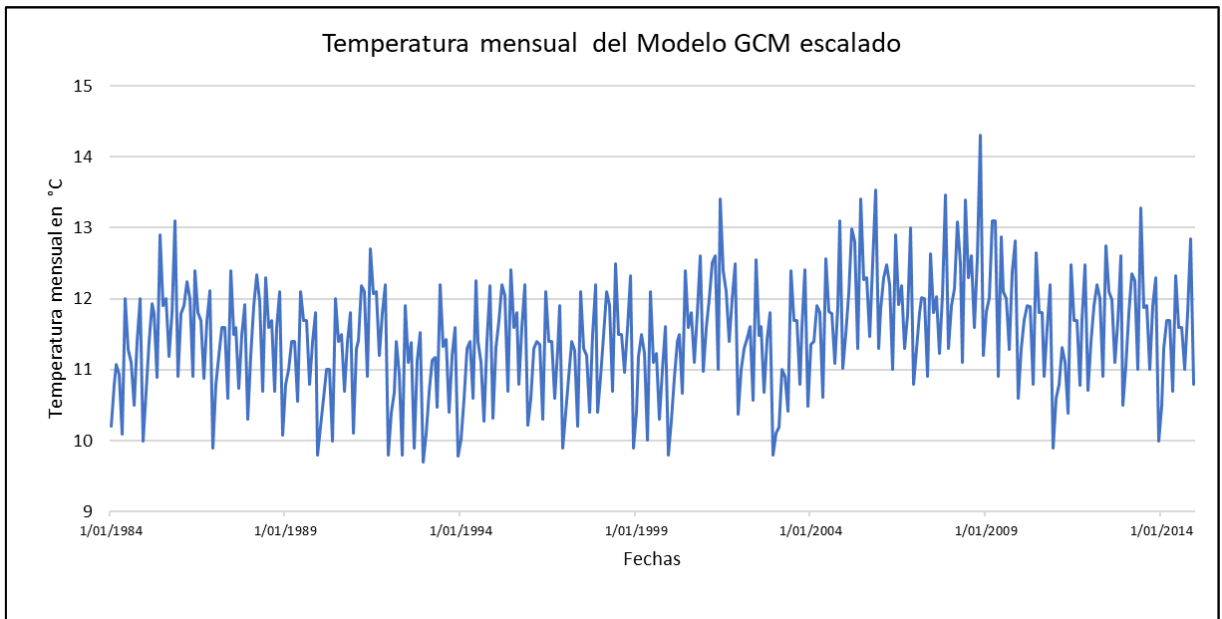


Figura 29: Reducción de escala de temperatura media del modelo GCM CNRM-ESM2-1f2

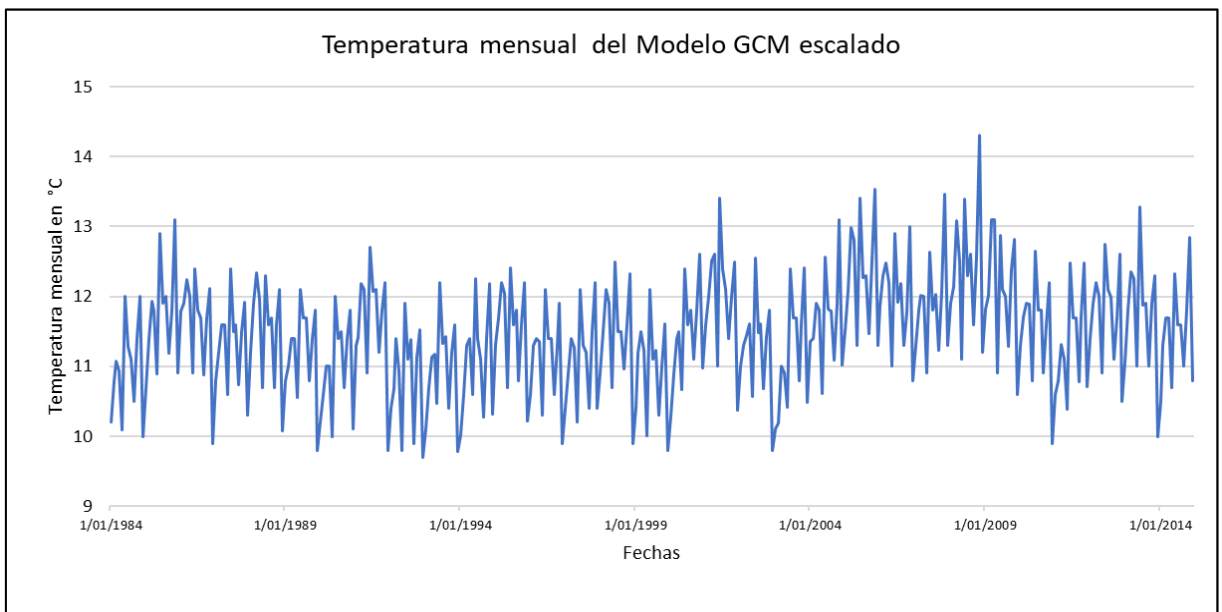


Figura 30: Reducción de escala de temperatura media del modelo GCM MIROC6

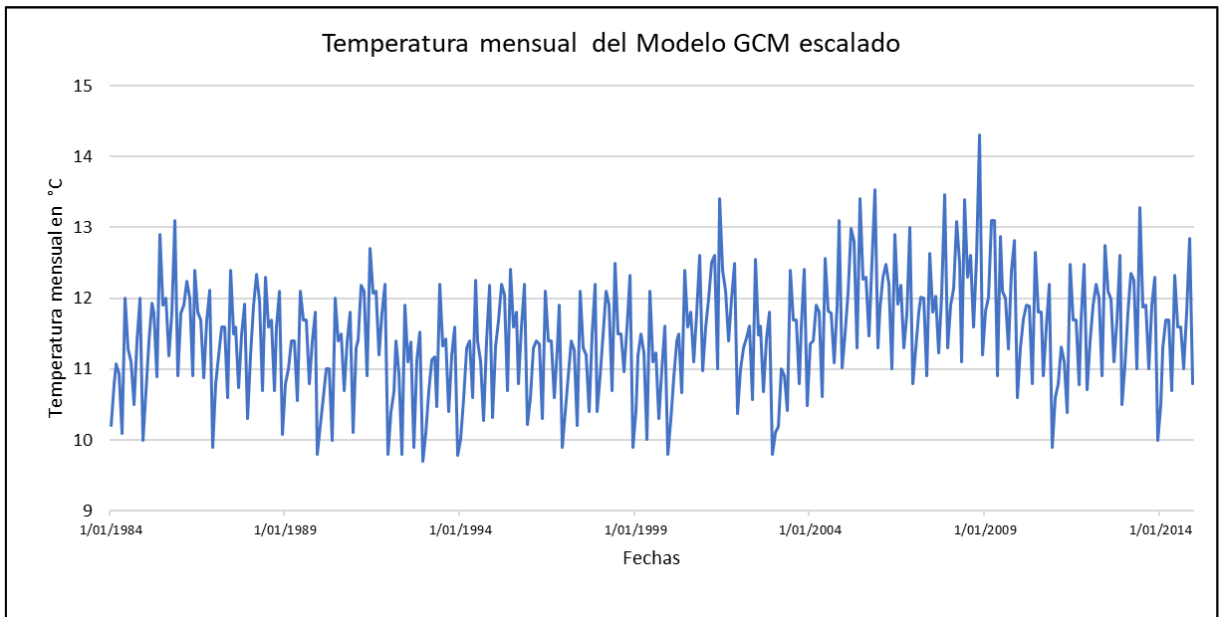


Figura 31: Reducción de escala de temperatura media del modelo GCM MIROC-ES2L f2 y

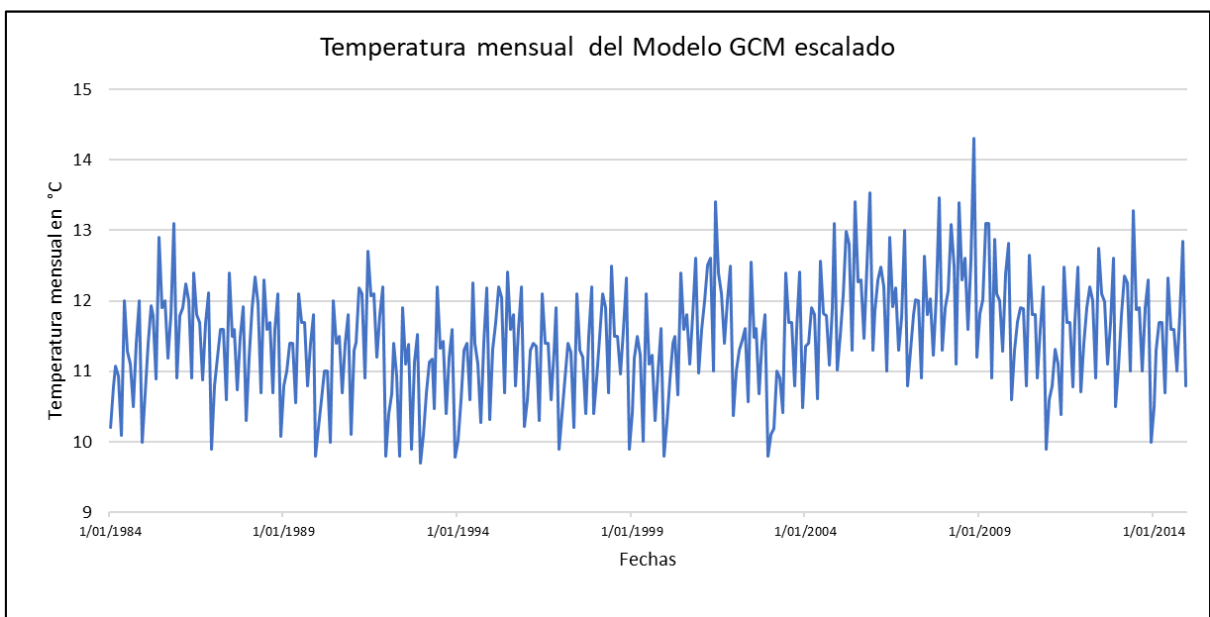


Figura 32: Reducción de escala de temperatura media del modelo GCM MRI-ESM2-0

3.9.3. Modelos climáticos GCM seleccionados

Después de realizar la corrección mediante el método de downscaling estadístico, se procedió a seleccionar el modelo de cambio climático más adecuado para el área de estudio. Esta selección se basó en un análisis estadístico que evaluó la concordancia entre los datos observados en el área y los datos corregidos estadísticamente de los GCM.

El fin de este análisis es determinar qué modelo se ajusta mejor a las series históricas observadas, lo que permitirá seleccionar el modelo más representativo para el área de estudio. La selección del modelo de cambio climático para la posterior evaluación de impactos se realizó a partir de la cuantificación de la bondad de ajuste de los datos observados para el ámbito del proyecto respecto a lo datos GCM corregidos estadísticamente.

Se presenta los coeficientes de ajuste para las series de precipitación y temperatura media de los modelos GCM escalados con los datos observados en los años 1984 a 2014 con mayor ajuste de todos los modelos GCM escalados.

La Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36 y Figura 37 muestra la comparación de la precipitación media observada para el escenario actual y los modelos GCM con mejor ajuste visual.

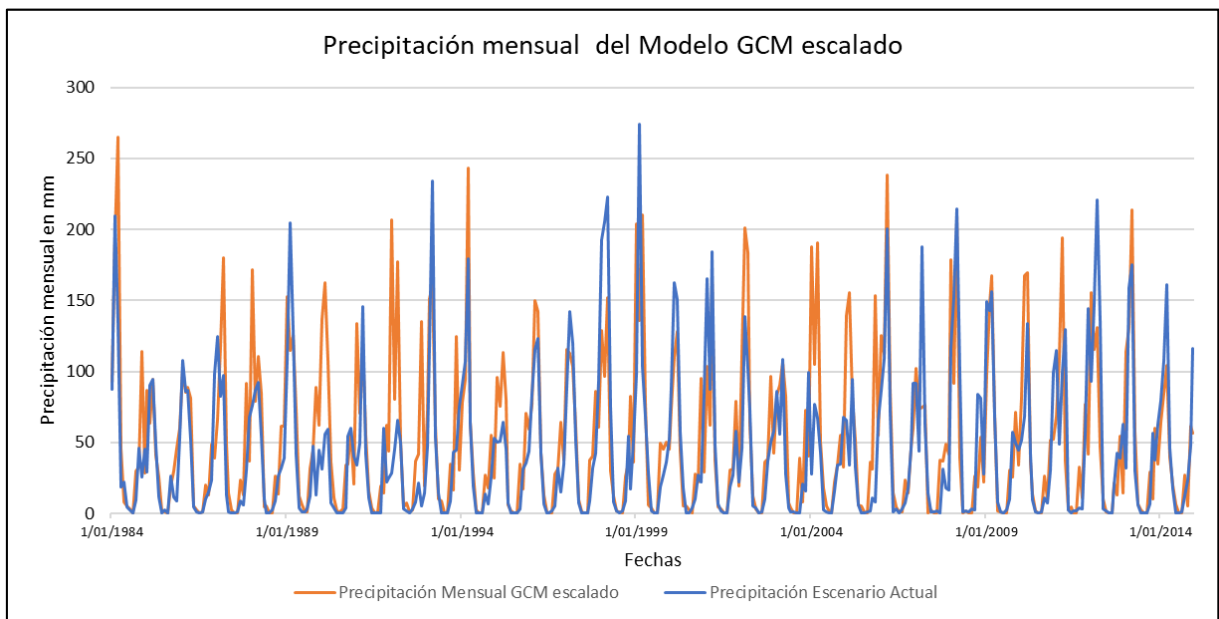


Figura 33: Comparación de la precipitación del modelo GCM AWI-CM-1-1-MR escalado y precipitación media observada

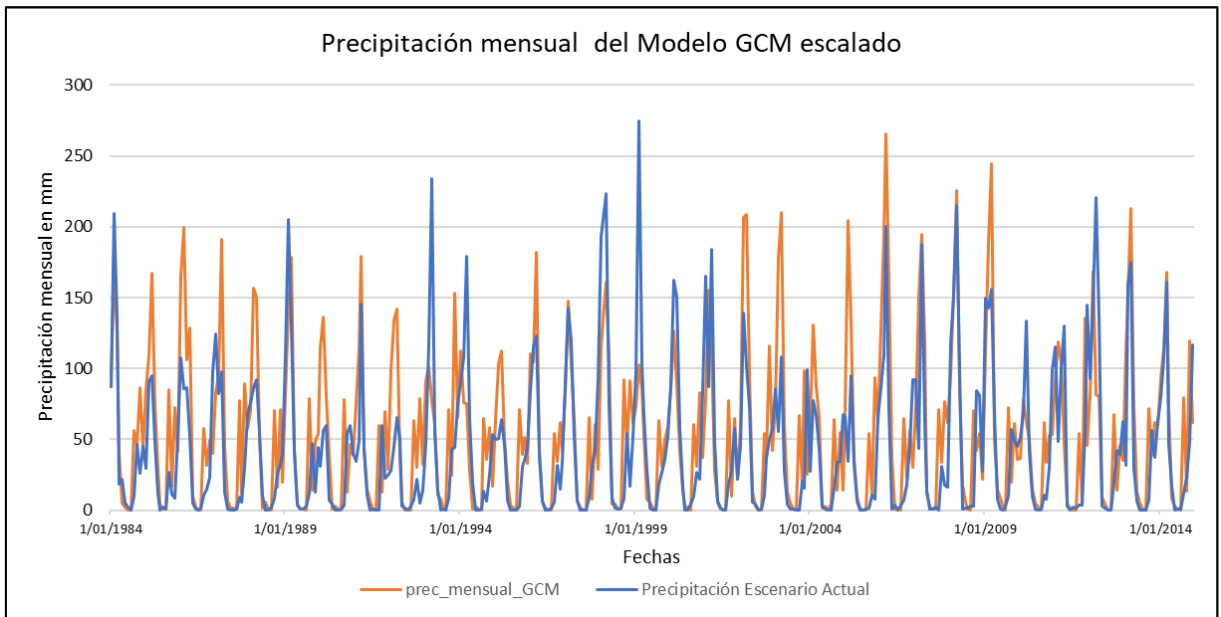


Figura 34: Comparación de la precipitación del modelo GCM AWI-CM-1-1-MR escalado y precipitación media observada

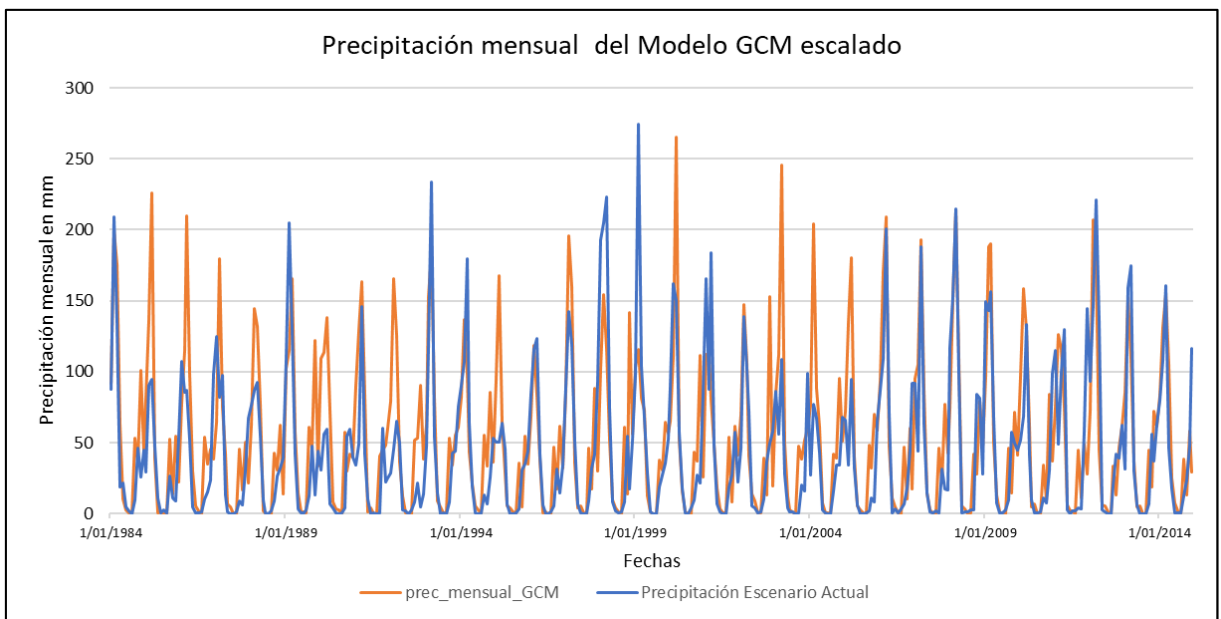


Figura 35: Comparación de la precipitación del modelo GCM AWI-CM-1-1-MR escalado y precipitación media observada

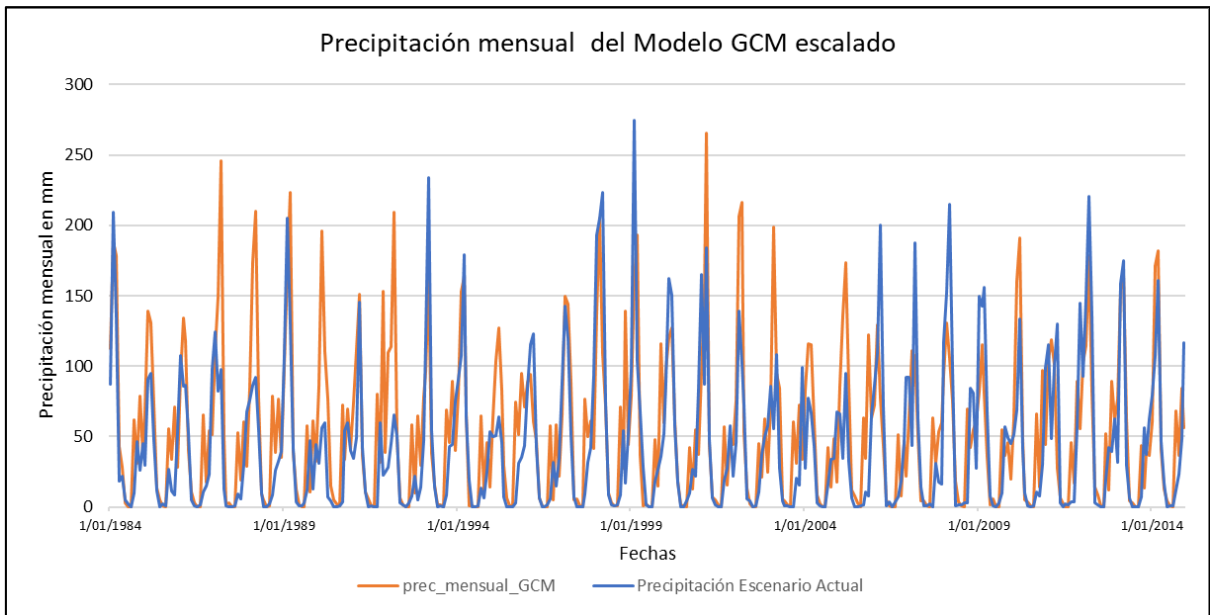


Figura 36: Comparación de la precipitación del modelo GCM AWI-CM-1-1-MR escalado y precipitación media observada

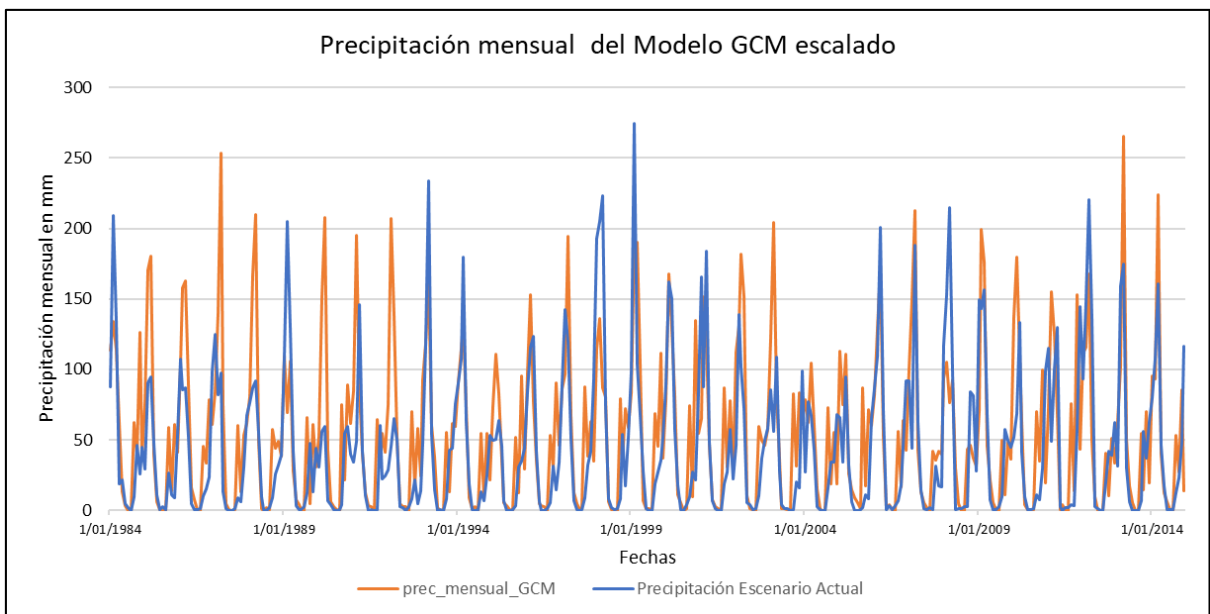


Figura 37: Comparación de la precipitación del modelo GCM AWI-CM-1-1-MR escalado y precipitación media observada

En la Tabla 4 se observa los coeficientes de ajuste para las series de precipitación de los modelos GCM escalados de AWI-CM-1-1-MR, BCC-CSM2-MR, CNRM-ESM2-1 f2, HadGEM3-GC31-MM f3 y NESM3 con la serie histórica de precipitación mensual del escenario actual.

Tabla 4: Coeficiente de ajuste para series de precipitación corregidas

Nombre del GCM	NSE	KGE	Coefficiente de Pearson
AWI-CM-1-1-MR	0.29	0.63	0.64
BCC-CSM2-MR	0.32	0.65	0.66
CNRM-ESM2-1 f2	0.41	0.69	0.70
HadGEM3-GC31-MM f3	0.39	0.68	0.69
NESM3	0.41	0.70	0.70

Se seleccionó el modelo GCM NESM3 para la variable de precipitación debido a que presenta mayor coeficiente KGE Kling-Gupt, Nash NSE y Coeficiente de Pearson.

El coeficiente de KGE fue diseñado para superar ciertas limitaciones presentes en el coeficiente de Nash-Sutcliffe. Estas limitaciones incluyen la susceptibilidad a valores extremos y la incapacidad para abordar sesgos sistemáticos en la simulación.

La Figura 38, Figura 39, Figura 40 y Figura 41 muestra la comparación de la temperatura media observada para el escenario actual y los modelos GCM respectivamente con mejor ajuste visual.

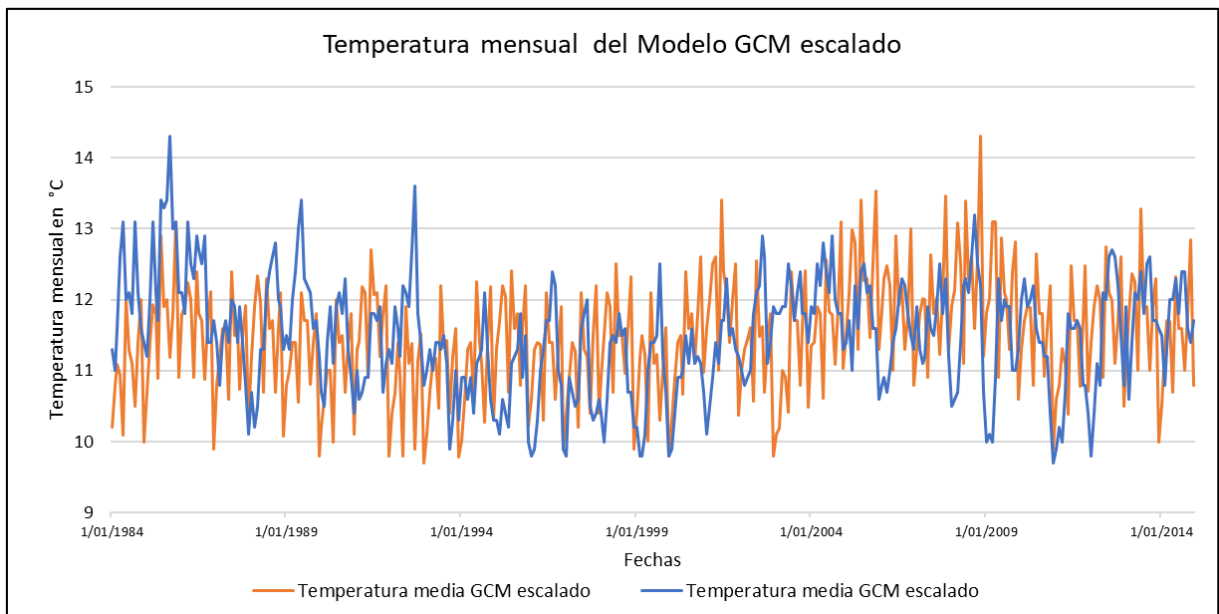


Figura 38: Comparación de la temperatura media del modelo GCM CNRM-ESM2-1 f2 escalado y temperatura media observada

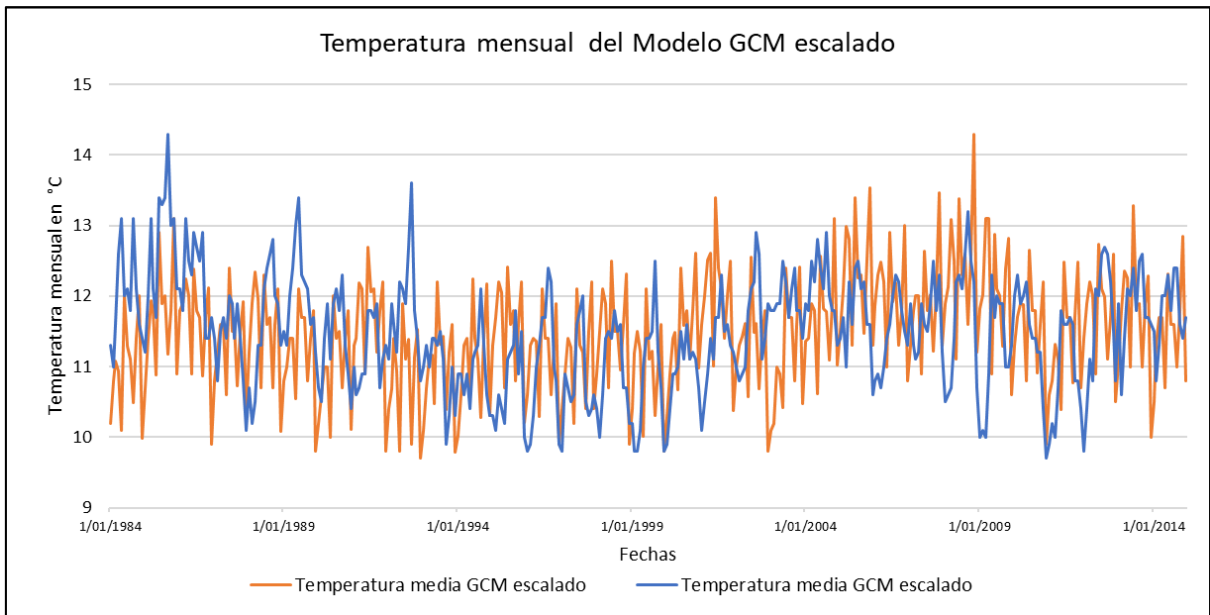


Figura 39: Comparación de la temperatura media del modelo GCM MIROC6 escalado y temperatura media observada

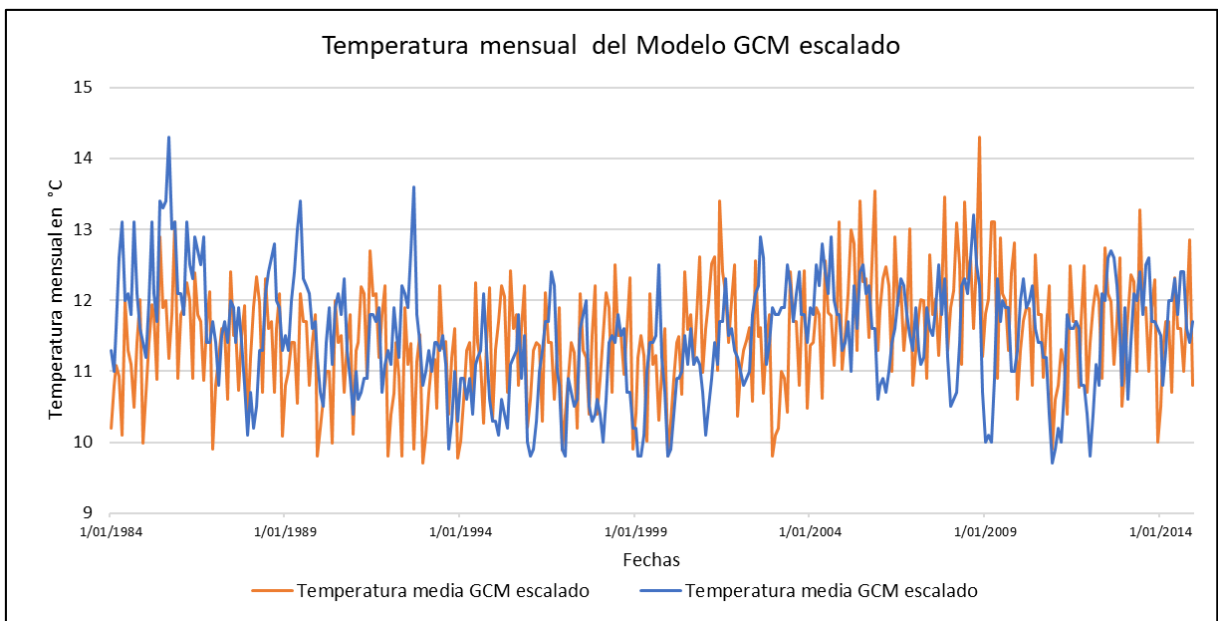


Figura 40: Comparación de la temperatura media del modelo GCM MIROC-ES2L f2 escalado y temperatura media observada

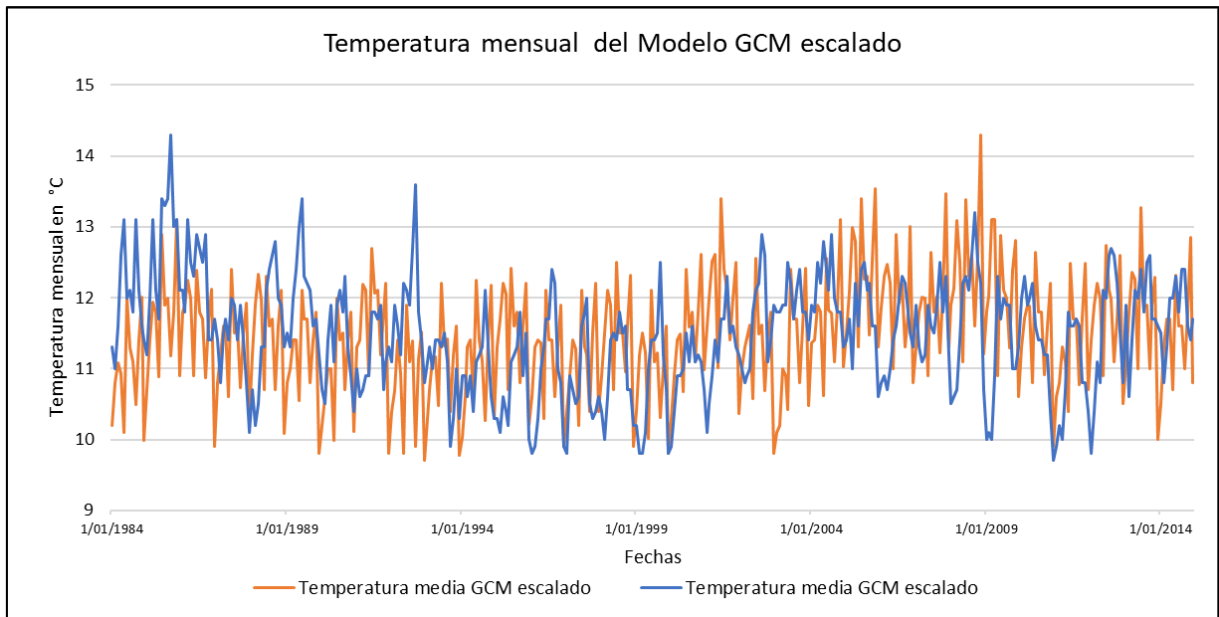


Figura 41: Comparación de la temperatura media del modelo GCM MRI-ESM2-0 escalado y temperatura media observada

En la Tabla 5 se observa los coeficientes de ajuste para las series de temperatura media de los modelos GCM escalados CNRM-ESM2-1 f2, MIROC6, MIROC-ES2L f2 y MRI-ESM2-0 con la serie histórica de la temperatura media del escenario actual.

Tabla 5: Coeficiente de ajuste para series de temperatura corregidas

Nombre del GCM	NSE	KGE	Coefficiente de Pearson
CNRM-ESM2-1 f2	-0.44	0.28	0.28
MIROC6	-0.33	0.33	0.33
MIROC-ES2L f2	-0.46	0.27	0.27
MRI-ESM2-0	-0.52	0.18	0.24

La Tabla 5 se muestran valores negativos del coeficiente de Nash, sin embargo, aunque el modelo no es perfecto debido a que el modelo de KGE es positivo tiene algunas mejoras en términos de sesgo y eficiencia de variabilidad en comparación con el NSE. Por ello se seleccionó el modelo GCM de MIROC6 para la variable de temperatura debido a que presenta mayor coeficiente de correlación de Pearson y Kling-Gupt entre todos los modelos de GCM.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Proyecciones de precipitación y temperatura media

Después de la selección del modelo GCM NESM3 para la variable de precipitación en la Figura 42 se muestra la precipitación proyectada para el escenario futuro I del año 2015 al año 2045 y en la Figura 43 se muestra la precipitación proyectada para el escenario Futuro II del año 2046 al 2076.

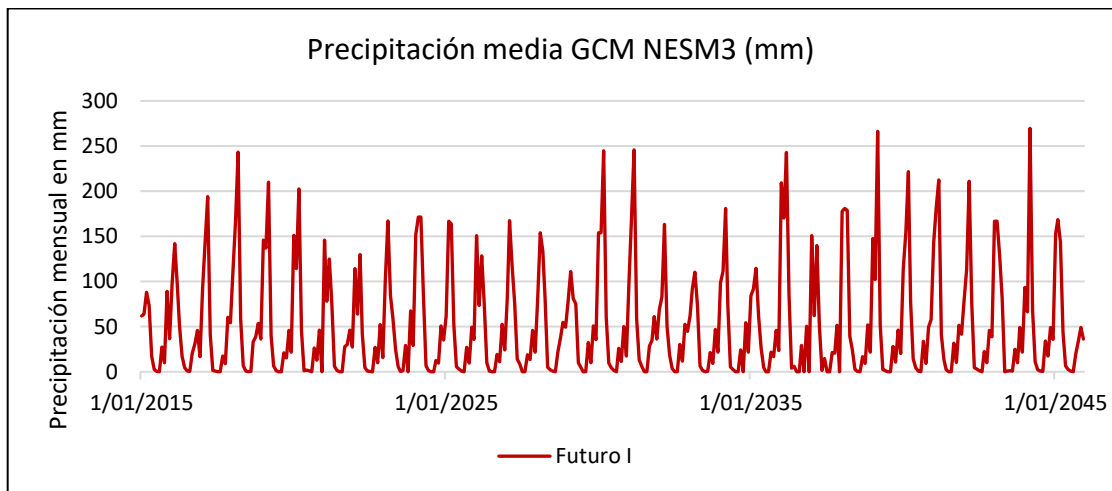


Figura 42: Precipitación media para el escenario Futuro I (2015-2045)

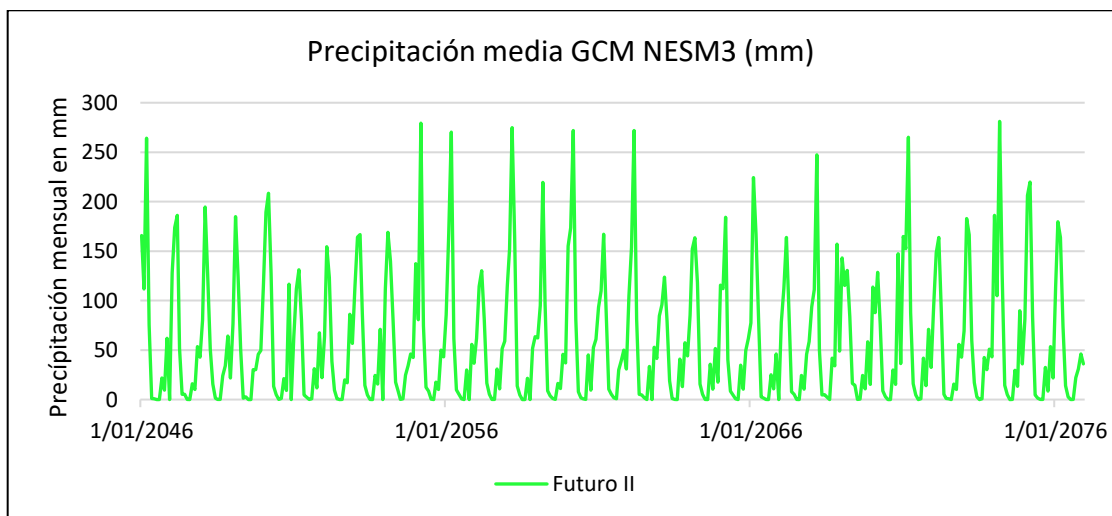


Figura 43: Precipitación media para el escenario Futuro II (2046-2076)

Después de la selección del modelo GCM MIROC6 para la variable de temperatura media en la Figura 44 se muestra la temperatura proyectada para el escenario futuro I del año 2015 al año 2045 y en la Figura 45 se muestra la precipitación proyectada para el escenario Futuro II del año 2046 al 2076.

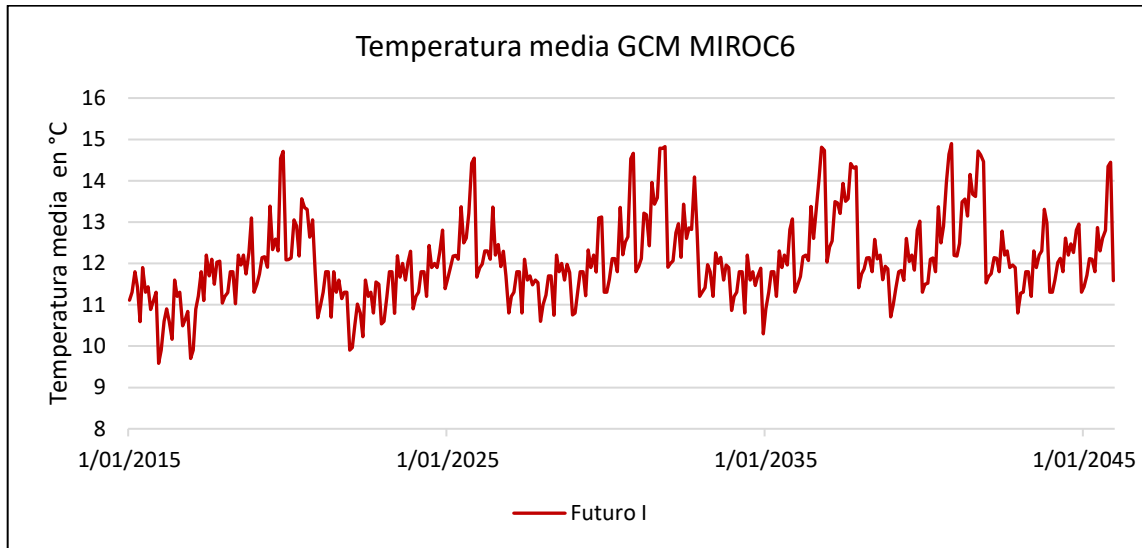


Figura 44: Temperatura media para el escenario Futuro I (2015-2045)

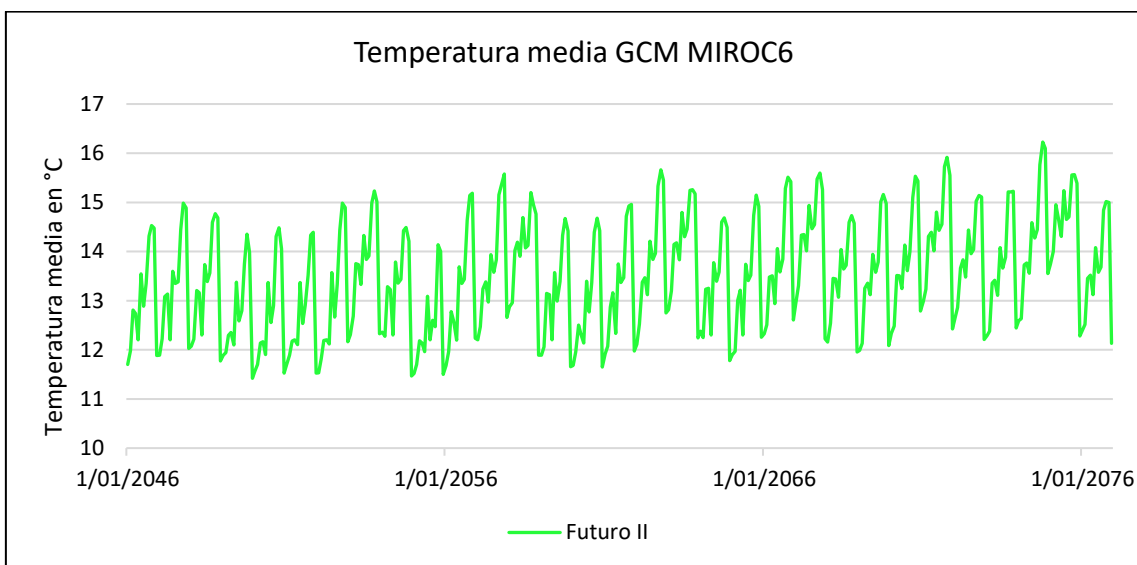


Figura 45: Temperatura media para el escenario Futuro II (2046-2076)

En la Figura 46 se muestra la precipitación promedio para el escenario Actual, Futuro I y Futuro II donde se observó que el mes de marzo es más húmedo en el escenario actual sin embargo en los escenarios Futuro I y Futuro II el mes más húmedo es febrero. Así como

también se denota que los meses más secos corresponde al mes de mayo a septiembre en los tres escenarios de evaluación.

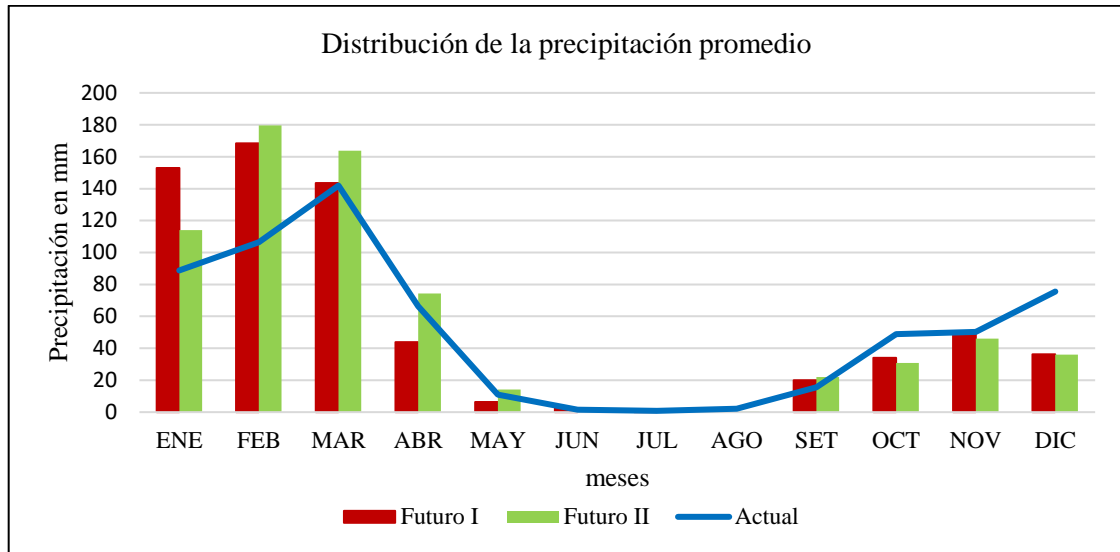


Figura 46: Precipitación promedio para cada escenario (Actual, Futuro I y Futuro II)

La Figura 47 muestra la temperatura media mensual promedio de los escenarios de evaluación donde se denota una tendencia al aumento respecto al escenario actual con los escenarios Futuro I y Futuro II.

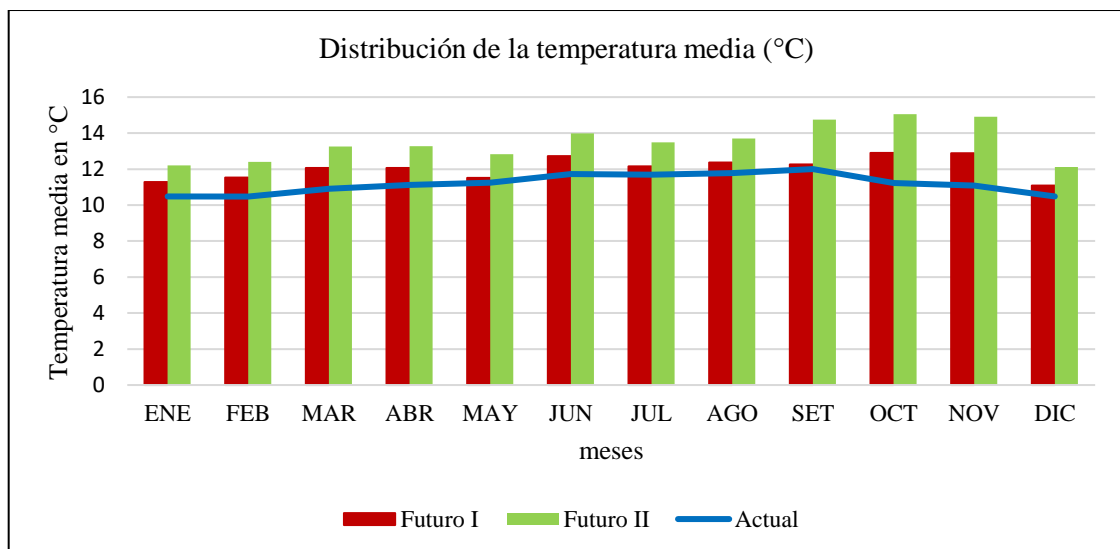


Figura 47: Temperatura promedio para cada escenario (Actual, Futuro I y Futuro II)

4.2. Disponibilidad hídrica superficial

La Figura 48, Figura 49 y Figura 50 presentan la disponibilidad hídrica superficial para el escenario actual y escenarios Futuros I y II en la cuenca del río Huarmey hasta el puente Huamba donde se observa que el mayor caudal mensual se presenta en el mes de marzo y una tendencia al aumento de la disponibilidad hídrica.

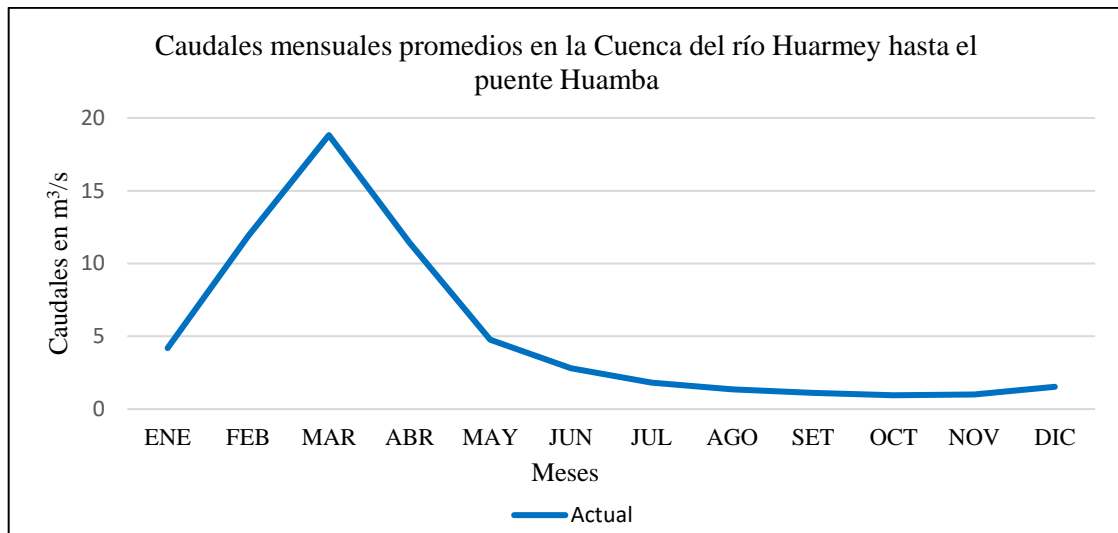


Figura 48: Disponibilidad hídrica del escenario actual (1984-2014) de la cuenca del río Huarmey hasta el puente Huamba

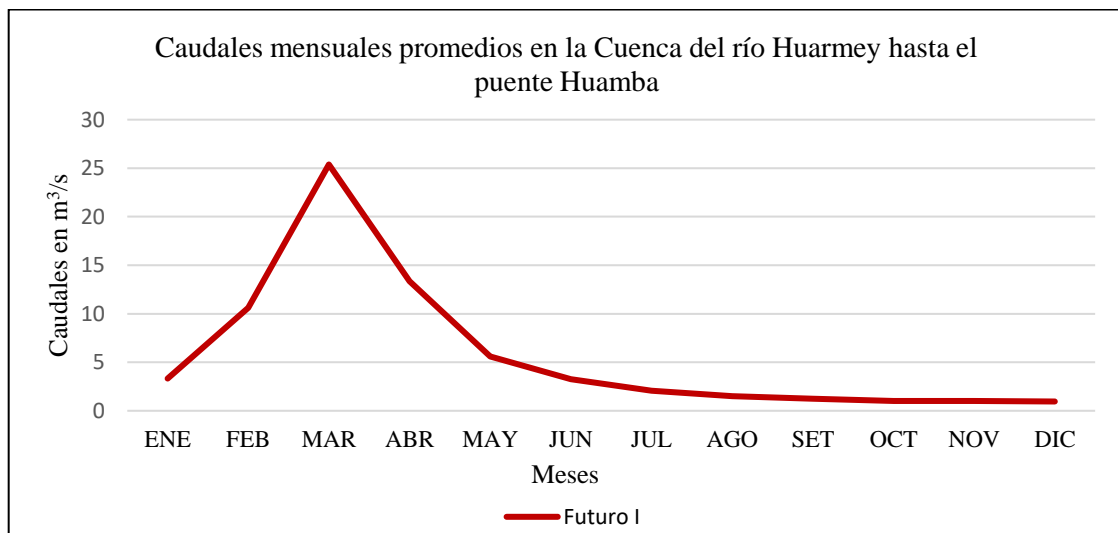


Figura 49: Disponibilidad hídrica del escenario futuro I (2015-2045) de la cuenca del río Huarmey hasta el puente Huamba.



Figura 50: Disponibilidad hídrica del escenario futuro II (2046-2076) de la cuenca del río Huarmey hasta el puente Huamba

Tabla 6: Caudales promedio mensual de la cuenca Huarmey hasta el puente Huamba

Escenario	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Actual (1984-2014)	4.2	11.9	18.8	11.4	4.8	2.8	1.8	1.4	1.1	1.0	1.0	1.5
Futuro I (2015-2045)	3.3	10.6	25.4	13.4	5.6	3.3	2.1	1.5	1.2	1.0	1.0	1.0
Futuro II (2046-2076)	4.2	11.9	31.7	18.6	6.8	3.7	2.3	1.6	1.3	1.1	1.3	1.3

La Tabla 6 muestra los caudales promedios mensuales para los escenarios de evaluación donde el caudal más alto es en el mes de marzo es de 18.8 m³/s para el escenario actual, 25.4 m³/s del escenario Futuro I y 31.7 m³/s para el escenario Futuro II.

La Tabla 7 y Figura 51 muestran la distribución mensual de los caudales de la cuenca del río Huarmey hasta el Puente Huamba donde en el mes de febrero se muestra la disminución de la disponibilidad hídrica para ese mes de 18 % a 14% y en el mes de marzo se incrementa la disponibilidad hídrica en el mes de marzo de 31% a 38%.

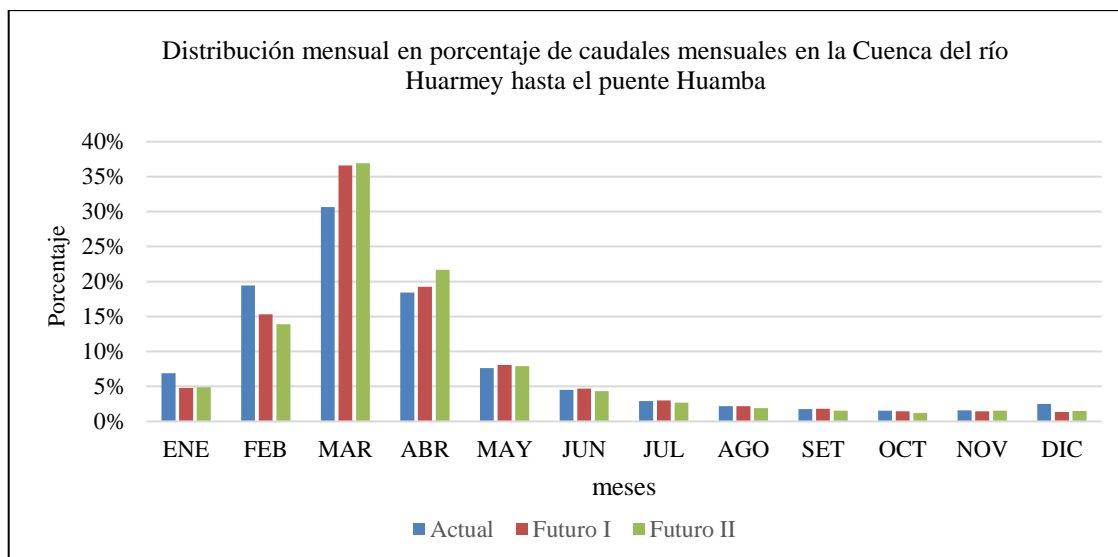


Figura 51: Distribución mensual de caudales de la cuenca del río Huarmey hasta el puente Huamba

Tabla 7: Distribución mensual de la cuenca Huarmey hasta el puente Huamba

Escenario	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Actual (1984-2014)	7%	18%	31%	18%	8%	5%	3%	2%	2%	2%	2%	3%
Futuro I (2015-2045)	5%	14%	37%	19%	8%	5%	3%	2%	2%	1%	1%	1%
Futuro II (2046-2076)	5%	13%	38%	21%	8%	4%	3%	2%	2%	1%	2%	2%

La Figura 52, Figura 53 y Figura 54 presentan la distribución mensual de la disponibilidad hídrica superficial para el escenario presente, escenario futuro I y escenario futuro II en la subcuenca Alto Huarmey donde se observa que el mayor caudal mensual se presenta en el mes de marzo y una tendencia al aumento de la disponibilidad hídrica.

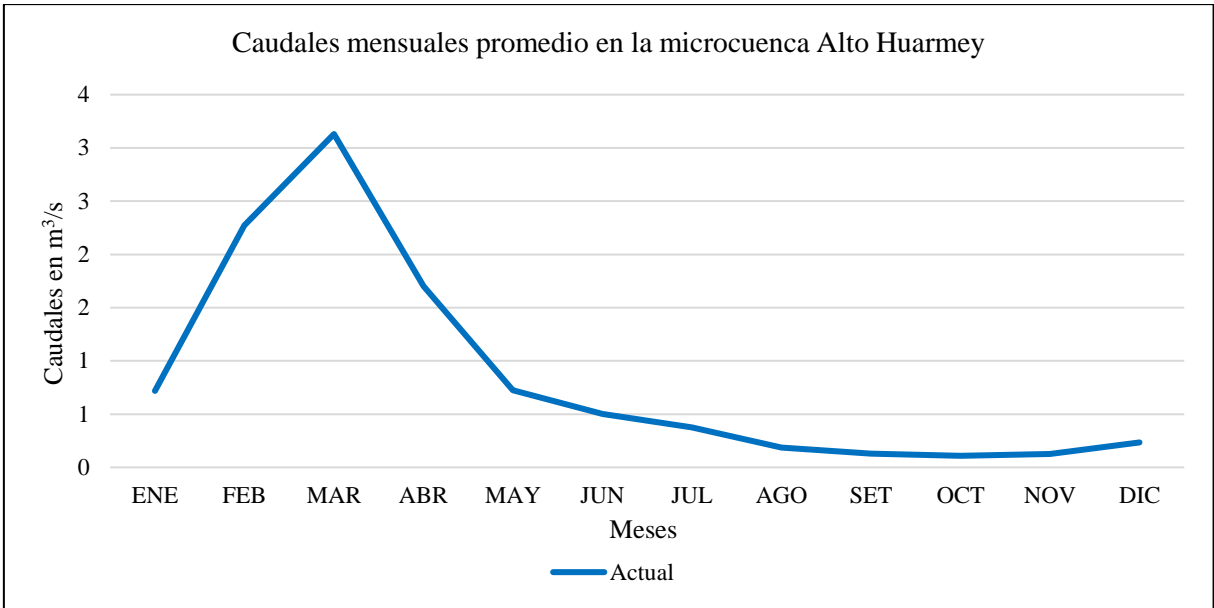


Figura 52: Disponibilidad hídrica de la subcuenca Alto Huarney

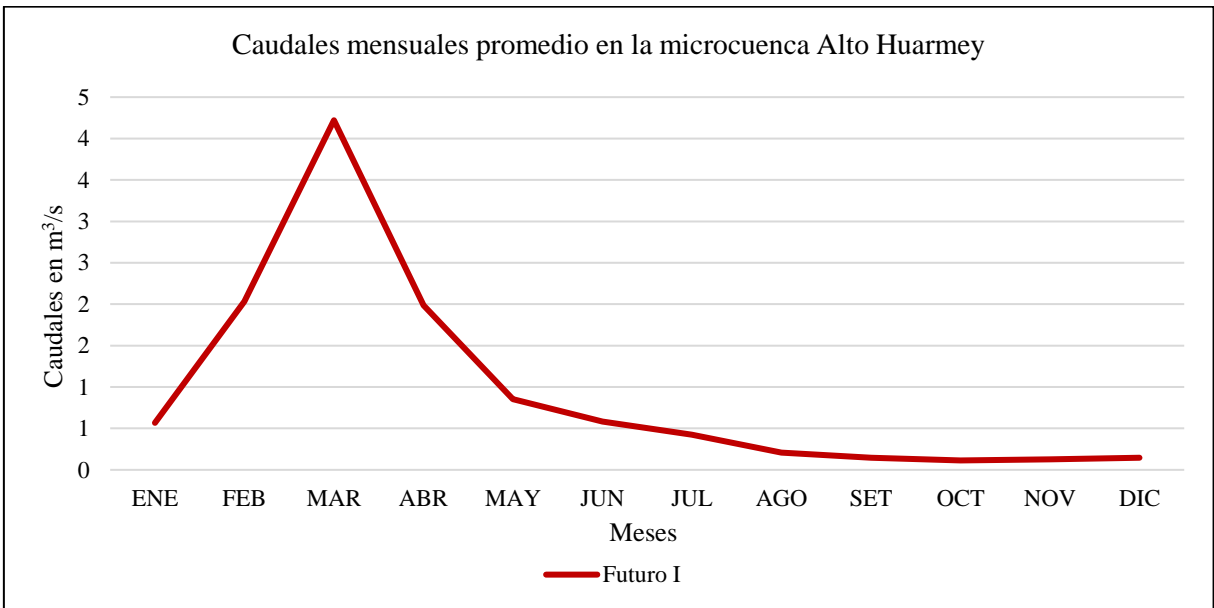


Figura 53: Disponibilidad hídrica de la subcuenca Alto Huarney

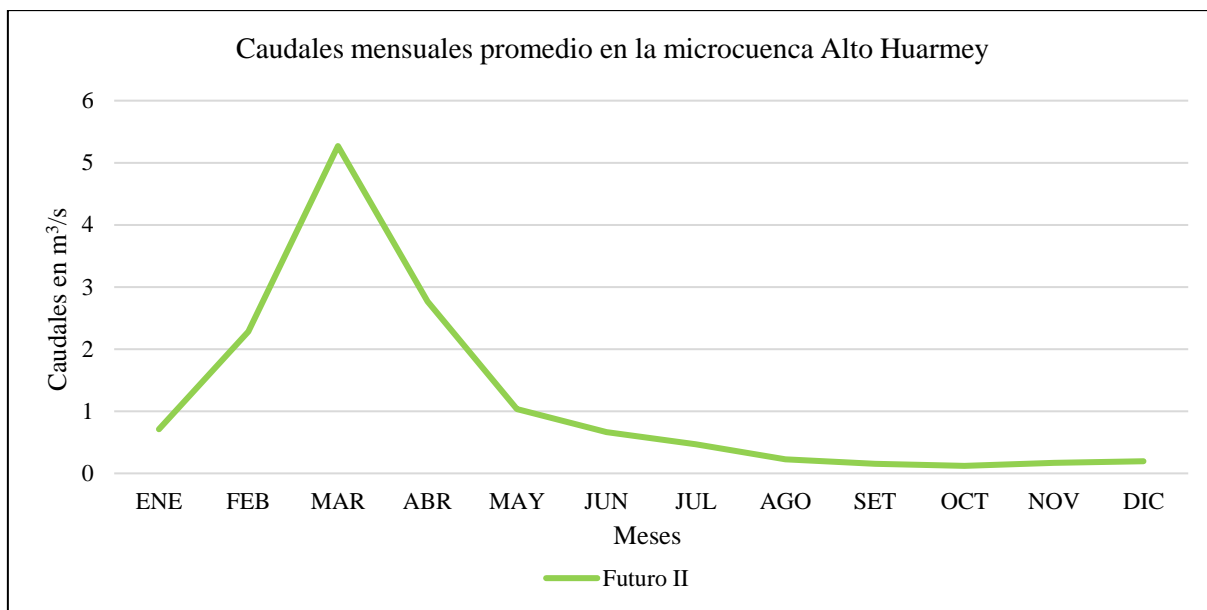


Figura 54: Disponibilidad hídrica de la subcuenca Alto Huarmey

La Tabla 8 muestra los caudales promedios mensuales para los escenarios de evaluación donde el caudal más alto es en el mes de marzo es de 3.1 m³/s para el escenario actual, 4.2 m³/s del escenario Futuro I y 5.3 m³/s para el escenario Futuro II.

Tabla 8: Caudales promedio mensual de la subcuenca Alto Huarmey

Escenario	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Actual (1984-2014)	0.7	2.3	3.1	1.7	0.7	0.5	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2
Futuro I (2015-2045)	0.6	2.0	4.2	2.0	0.9	0.6	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
Futuro II (2046-2076)	0.7	2.3	5.3	2.8	1.0	0.7	0.5	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2

La Figura 55 y Tabla 9 muestran la distribución mensual de los caudales de la subcuenca alto Huarmey donde en el mes de febrero se muestra la disminución de la disponibilidad hídrica para ese mes de 21 % a 15% y en el mes de marzo se incrementa la disponibilidad hídrica en el mes de marzo de 32% a 38%.

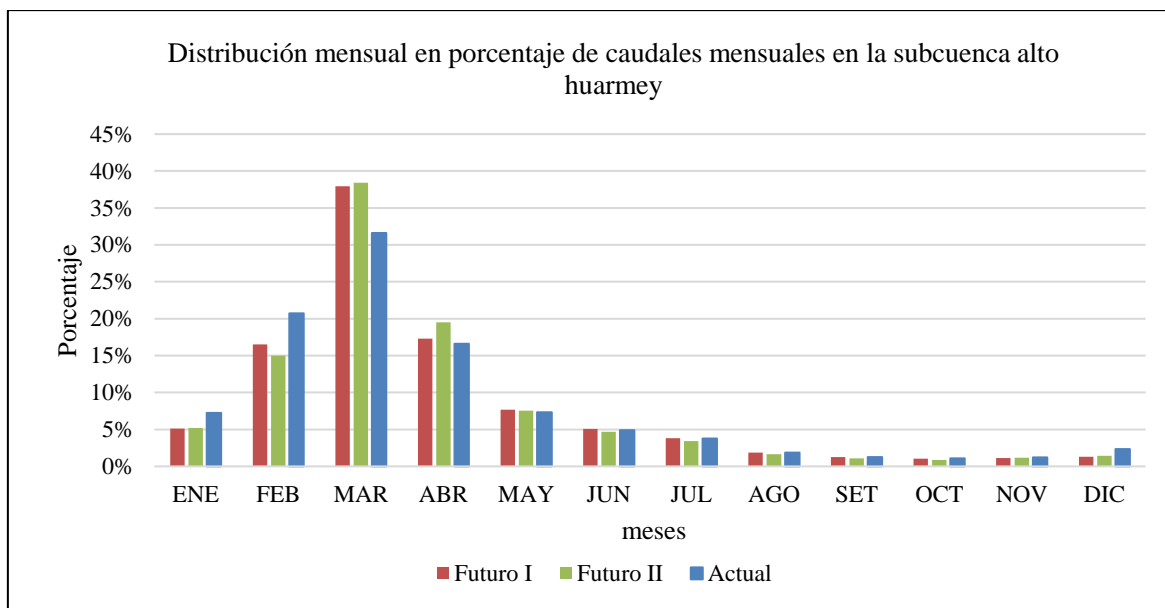


Figura 55: Distribución mensual de la subcuenca Alto Huarney

Tabla 9: Distribución mensual de la subcuenca Alto Huarney

Escenario	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Actual (1984-2014)	7%	21%	32%	17%	7%	5%	4%	2%	1%	1%	1%	2%
Futuro I (2015-2045)	5%	17%	38%	17%	8%	5%	4%	2%	1%	1%	1%	1%
Futuro II (2046-2076)	5%	15%	38%	20%	8%	5%	3%	2%	1%	1%	1%	1%

V. CONCLUSIONES

- El modelo climático seleccionado para la microcuenca Alto Huarmey de la variable de precipitación, NESM3, demostró el mejor ajuste estadístico entre los 31 modelos climáticos analizados GCM, con un mayor coeficiente de Pearson ($r = 0.70$), coeficiente de Nash Sutcliffe ($NSE = 0.41$) y un coeficiente de KGE de 0.7 para la variable de precipitación. Asimismo, para la variable de temperatura media, el modelo climático seleccionado, MIROC6, mostró el mejor ajuste estadístico entre los 30 modelos climáticos GCM, con un mayor coeficiente de Pearson ($r = 0,33$), y un coeficiente de KGE de 0.33.
- Se estimaron las proyecciones mensuales de temperatura media para los escenarios futuros I y II donde se observó que la temperatura media para el escenario Futuro I varía de 11.1 a 12.9 °C, en el escenario Futuro II de 12.1 a 15.0°C y en el escenario actual 10.5 a 12 °C. denotando probabilidad del aumento en la temperatura media en los escenarios Futuro I y Futuro II.
- Se estimaron las proyecciones mensuales de precipitación para los escenarios futuros I y II donde se observó que la precipitación media mensual que el mes de marzo es el mes más húmedo en el escenario actual; en cambio en los escenarios Futuro I y Futuro II el mes más húmedo es febrero. Por otro lado, la precipitación multianual en el escenario actual es 609 mm, escenario Futuro I es 658 mm y escenario Futuro II es 684 mm. En conclusión, la precipitación mensual presenta probabilidad de cambios cualitativos y cuantitativos y la precipitación multianual denotando probabilidad de una al incremento en los escenarios Futuro I y Futuro II.
- La disponibilidad hídrica en los escenarios futuros I y II respecto al escenario actual presenta una variación cuantitativa con tendencia al aumento al presentar un caudal máximo promedio mensual en el escenario actual de 3.1 m³/s, escenario Futuro I de

4.2 m³/s y escenario Futuro II es de 5.3m³/s en los distintos escenarios de evaluación. Así mismo la disponibilidad hídrica a nivel anual el escenario actual (1984 - 2014) le corresponde un volumen de 26.5 MMC, el escenario futuro I (2015-2045) es de 29.78 MMC y el escenario futuro II (2046-2076) es de 36.8 MMC. También presenta una tendencia al aumento en los escenarios Futuro I y Futuro II.

VI. RECOMENDACIONES

- Evaluar la disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca Alto Huarmey para los otros escenarios de cambio climático como SSP1, SPP2, SPP3 y SSP4.
- Evaluar la calibración y validación del modelo hidrológico empleando los caudales mensuales proporcionados por el producto grillado PISCO_HyM_GR2M.
- Evaluar la disponibilidad hídrica superficial de la subcuenca Alto Huarmey con modelos hidrológicos donde se consideren la cobertura vegetal y el tipo de suelo actual para proyectar los efectos de cambio climático como por ejemplo SWAT.
- Realizar un modelamiento hidrodinámico para determinar las áreas vulnerables o inundables debido al aumento de disponibilidad hídrica con los caudales promedios estimados en el mes de marzo en los escenarios Futuro I y Futuro II.
- Los resultados obtenidos en este estudio pueden resultar útiles como guía para la implementación de políticas orientadas a mitigar los efectos del cambio climático. No obstante, estos no deben ser tomados como un pronóstico climático dado que para los modelos y escenarios de cambio climático se hacen una serie de supuestos y simplificaciones.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2016). Gestión de la disponibilidad de los recursos hídricos en el Perú. Recuperado de <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4301>
- Aparicio, F.J. (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. México: Limusa. Recuperado de <https://www.udocz.com/apuntes/2329/hidrologia-de-superficie---aparicio-pdf>
- Cabrera, J. (2013). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Lima, Perú.
- Cabrera, J. (2017). *Modelos hidrológicos*. Instituto Para La Mitigación de Los Efectos Del Fenómeno El Niño, 8.
- Chow, V.T., Maidment, D. y Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Escoto, C.A., Sánchez, P.L., Gachuz, D.S. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 32(3): 669-693.
- Espinoza, J.C. (2005). *El Método del Vector Regional de Índices Pluviométricos*. Curso taller: Utilización del método del Vector Regional con HYDRACCESS.: SENAMHI-Perú, 2005. Recuperado de <https://dokumen.tips/documents/el-metodo-del-vector-regional-de-indices-pluviometricos.html>.
- Fattorelli, S. y Fernández, P. (2011). *Diseño hidrológico* (2da ed.). Zaragoza, España: WASA-GN. 531 p.
- Feigenwinter, I., Kotlarski, S., Casanueva, A., Fischer, A., Schwierz, C. & Liniger, M.A. (2018). Exploring quantile mapping as a tool to produce user tailored climate scenarios for Switzerland. *Technical Report MeteoSwiss*.
- Food Agriculture Organization (FAO). (1996). *Ecología y enseñanza rural. Nociones ambientales básicas para profesores rurales y extensionistas. Nociones ambientales básicas para Profesores Rurales y Extensionistas*.

- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., & Martinez, G.F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2009.08.003>
- Moss, R.H., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J. ... Zurek, M. (2008). *Exploración de nuevos escenarios para el análisis de las emisiones, de cambio climático, de sus impactos y de las estrategias de respuesta*. Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Mouelhi, S. (2003). *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier* (Tesis Doctoral). Escuela Nacional de Ingeniería Rural, Agua y Bosques, París, Francia. 323 p.
- Mouelhi, S. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318 (1–4), 200–214. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.014
- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Oria, C., Llacza Rodríguez, A., Jácome Vergaray, G., & Barreto Schuler, C. (2013). *Evaluación de los modelos CMIP5 del IPCC en el Perú: Proyecciones al año 2030 en la región Huancavelica*. SENAMHI. Recuperado de https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/216#.Yo1n_NBtsy0.mendeley%0A148
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático. (2007). General Guidelines on the Use of Scenario Data for climate impact and adaptation assessment.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático. (2013). Cambio climático Bases físicas Resumen para responsables de políticas. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FIN_AL_SPANISH.pdf
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático. (2014). *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis*. In Intergovernmental Panel on 145 Climate Change (Ed.), *Climate Change 2013: The physical science basis*.

- Panel Intergubernamental del Cambio Climático. (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Pascual, J. y Díaz, M. (2016). *Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS*. Recuperado de: http://eprints.imdeaagua.org:13000/711/1/Cuadernos%20de%20Geom%C3%A1tica%204_b.pdf
- SENAMHI. (2023). *Disponibilidad Hídrica*. Recuperado de https://idesepe.senamhi.gob.pe/portalidesepe/idesepe_tema_cambio_climatico_disponibilidad_hidrica_analisis_comparativo.jsp
- SENAMHI. (2020). Climas del Perú: Mapa de clasificación climática nacional. Recuperado de https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/761/Climas-del-Per%c3%ba-mapas-de-clasificaci%c3%b3n-clim%c3%a1tica-nacional-resumen-ejecutivo_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- SENAMHI. (2021). Escenarios climáticos al 2050 en el Perú: Cambios en el clima promedio. Lima, Perú: SENAMHI. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1470>
- Solman, S.A. (2011). *Actividad humana y cambio climático*. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera.
- Thornthwaite, C.W. & Mather, J.R. (1957). *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Laboratory of Climatology.
- Vauchel, P. (2006). *Hydraccess, Software Hidrológico*. Recuperado de <http://www.sohybam.org/index.php/esl/Software/Hydraccess>
- Villón, M. (2002). *Hidrología* (2da ed.). Perú: Villón. 380 p.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Modelos GCM de la variable de temperatura media

A continuación, en la Figura 56 a la Figura 85, se presenta de las series de temperatura media mensual del año 1984 al año 2100 de cada modelo de GCM.

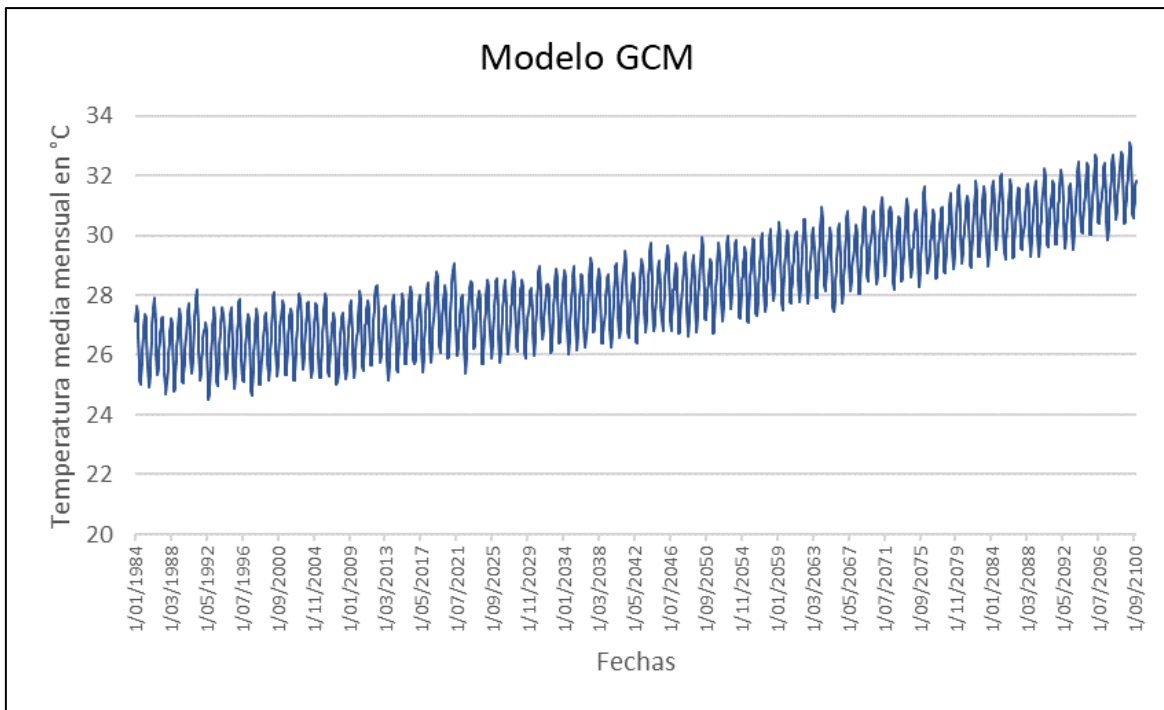


Figura 56: Temperatura mensual del GCM ACCESO-CM2

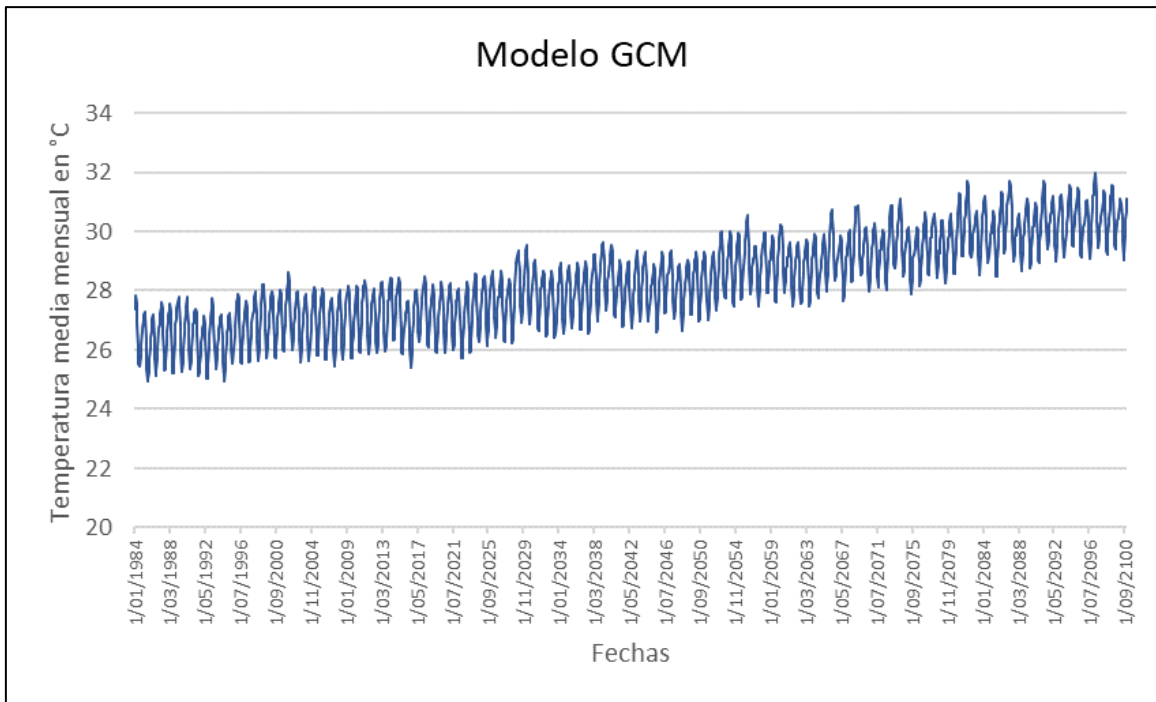


Figura 57: Temperatura mensual del GCM ACCESO-ESM1-5

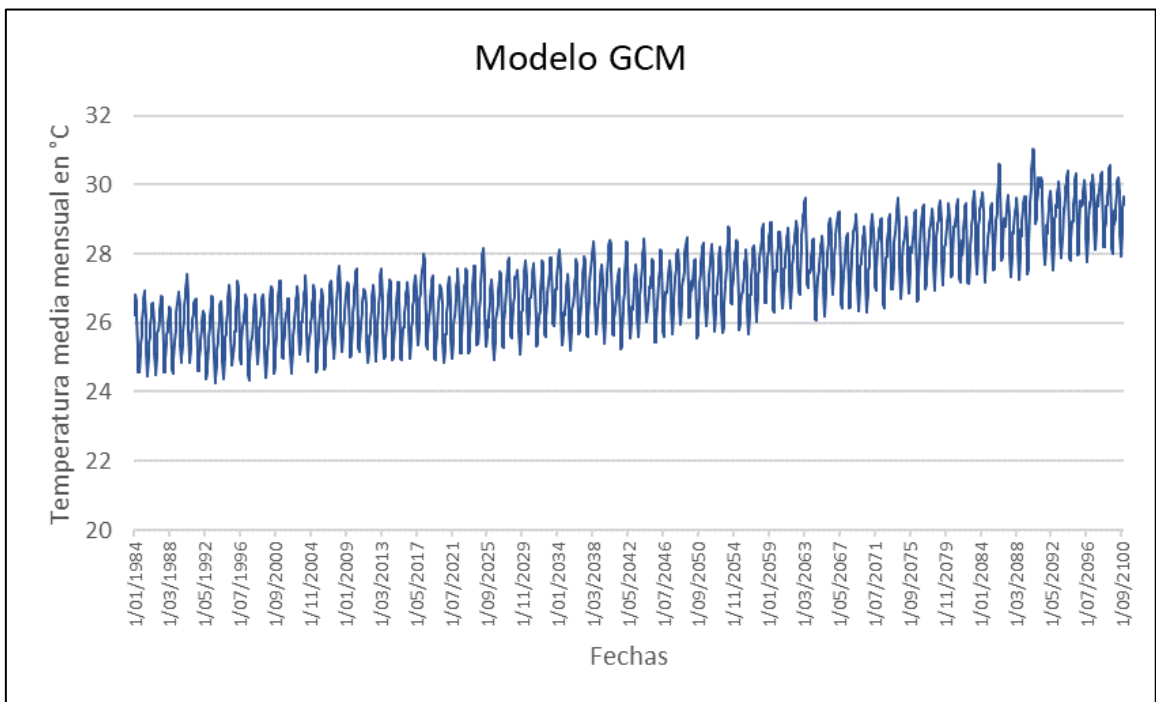


Figura 58: Temperatura mensual del GCM AWI-CM-1-1-MR

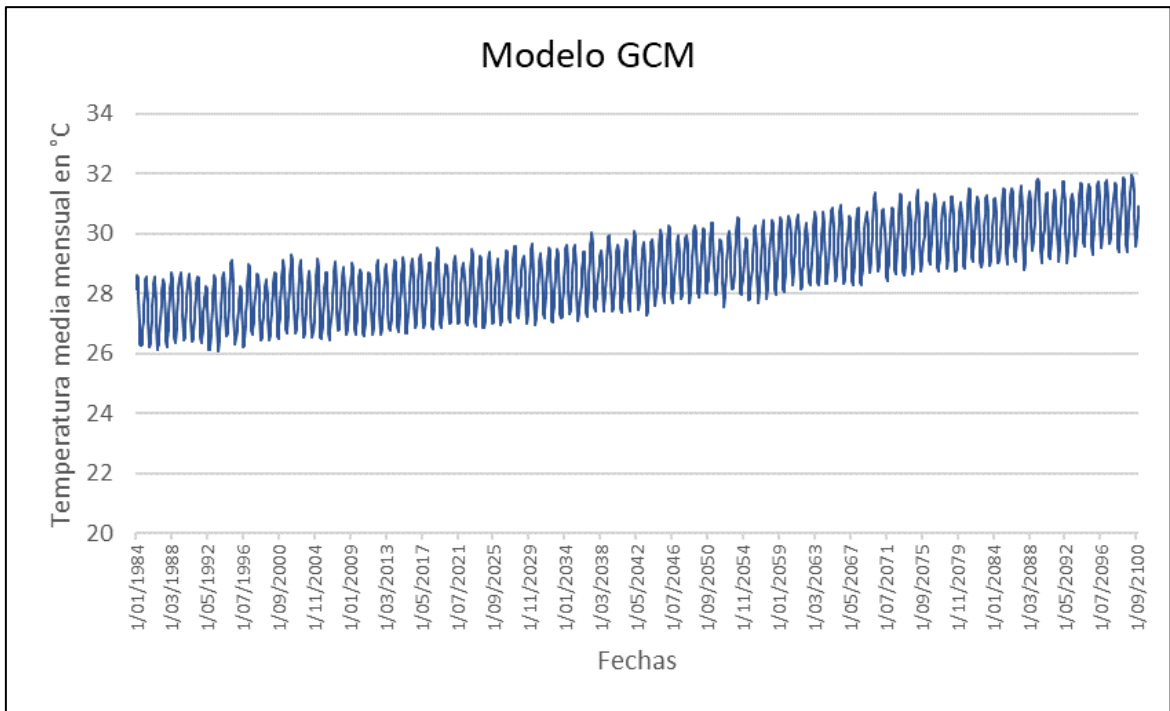


Figura 59: Temperatura mensual del GCM BCC-CSM2-MR

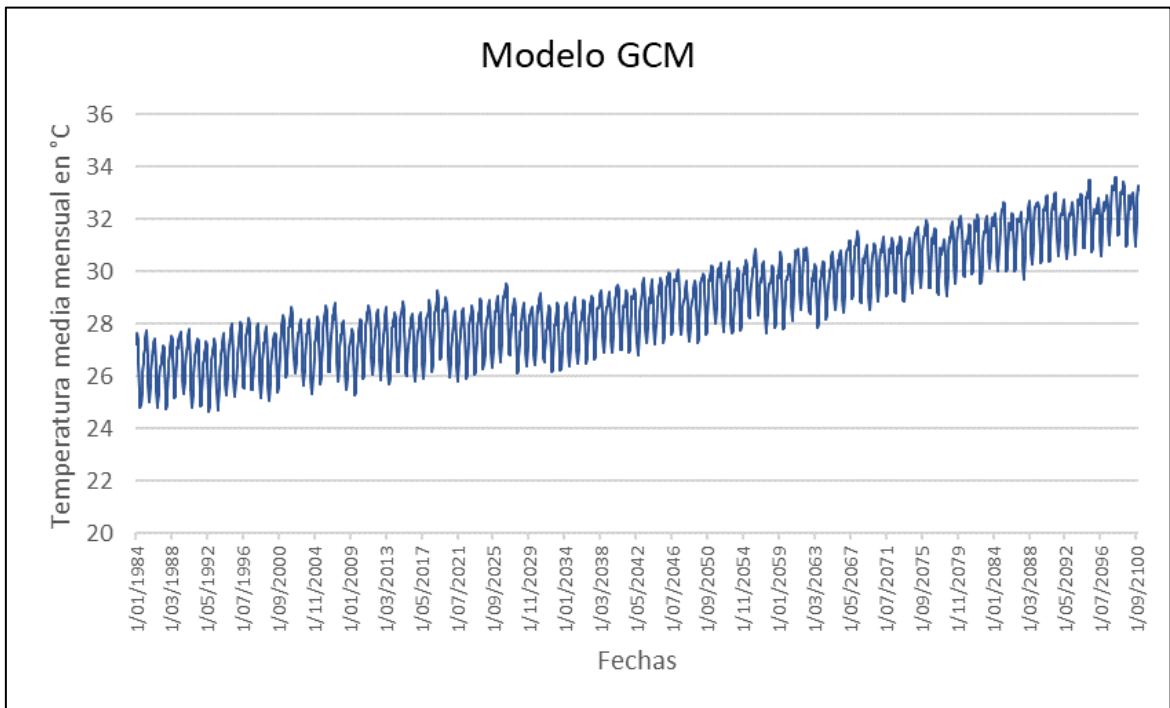


Figura 60: Temperatura mensual de GCM CanESM5 p1

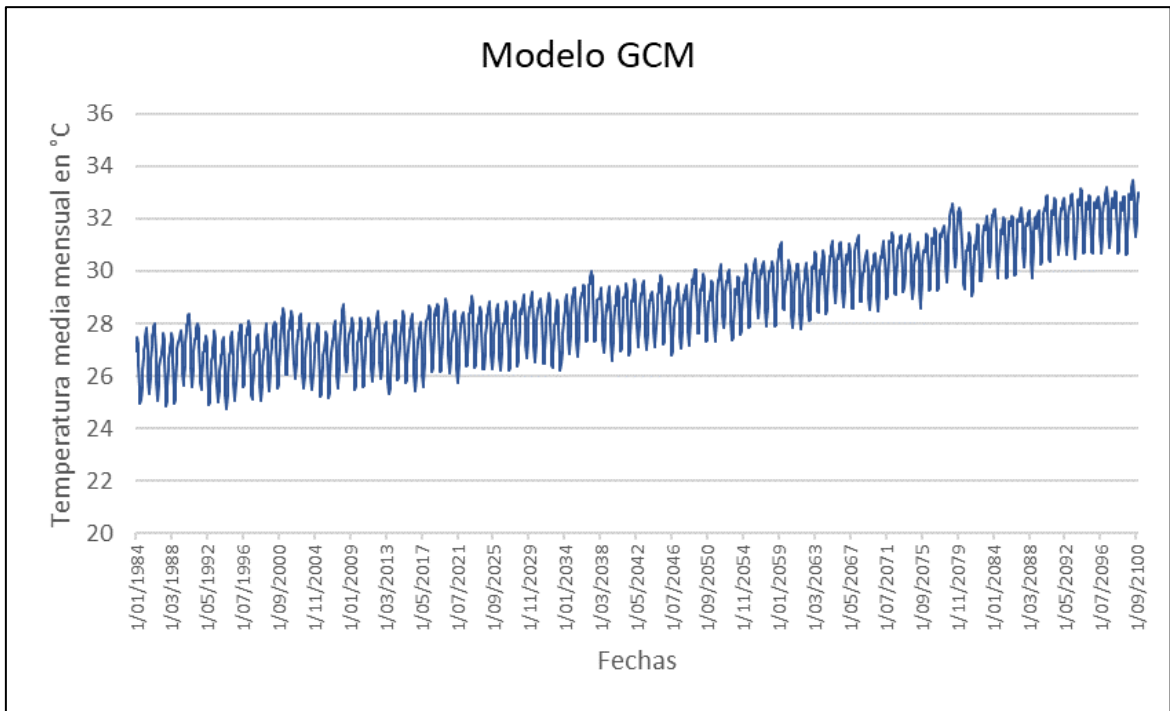


Figura 61: Temperatura mensual de GCM CanESM5-CanOE p2

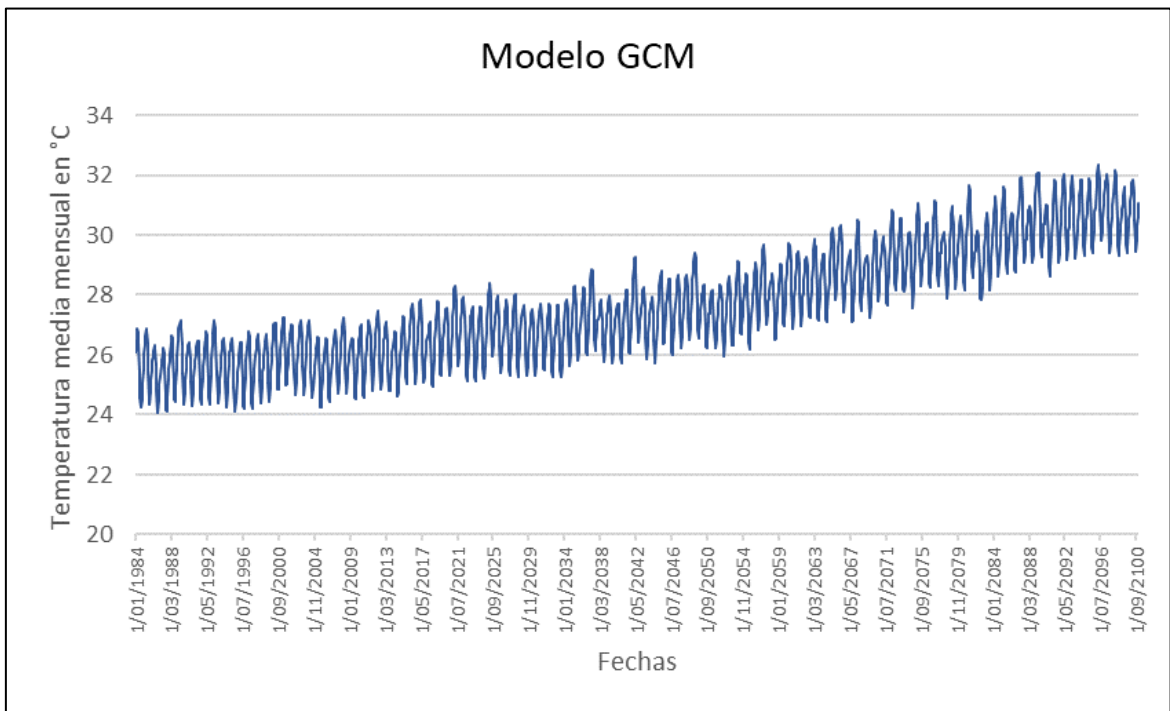


Figura 62: Temperatura mensual CESM2-WACCM

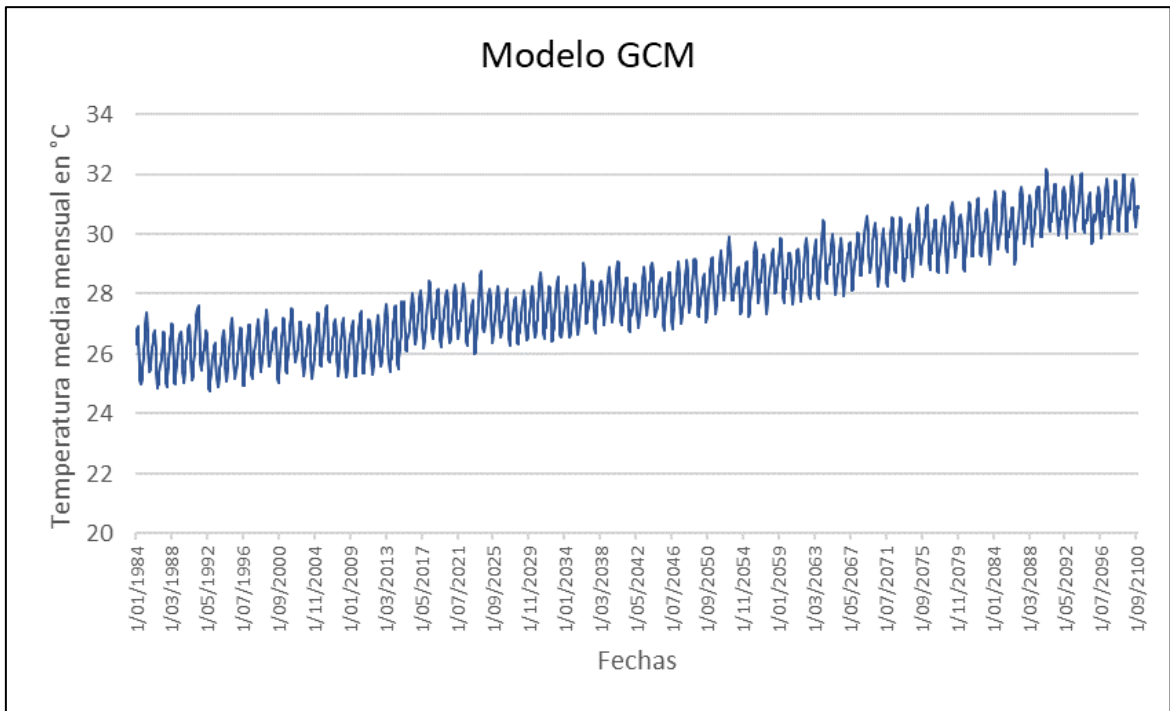


Figura 63: Temperatura mensual CIEMM

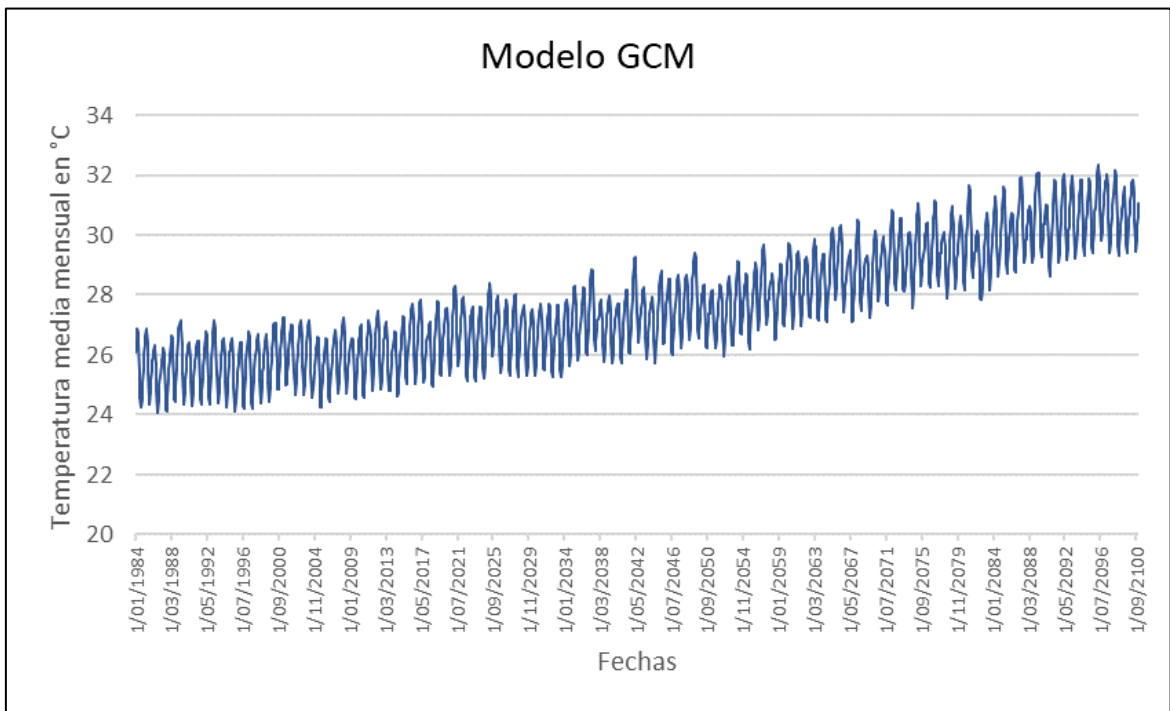


Figura 64: Temperatura mensual CNRM-CM6-1 f2

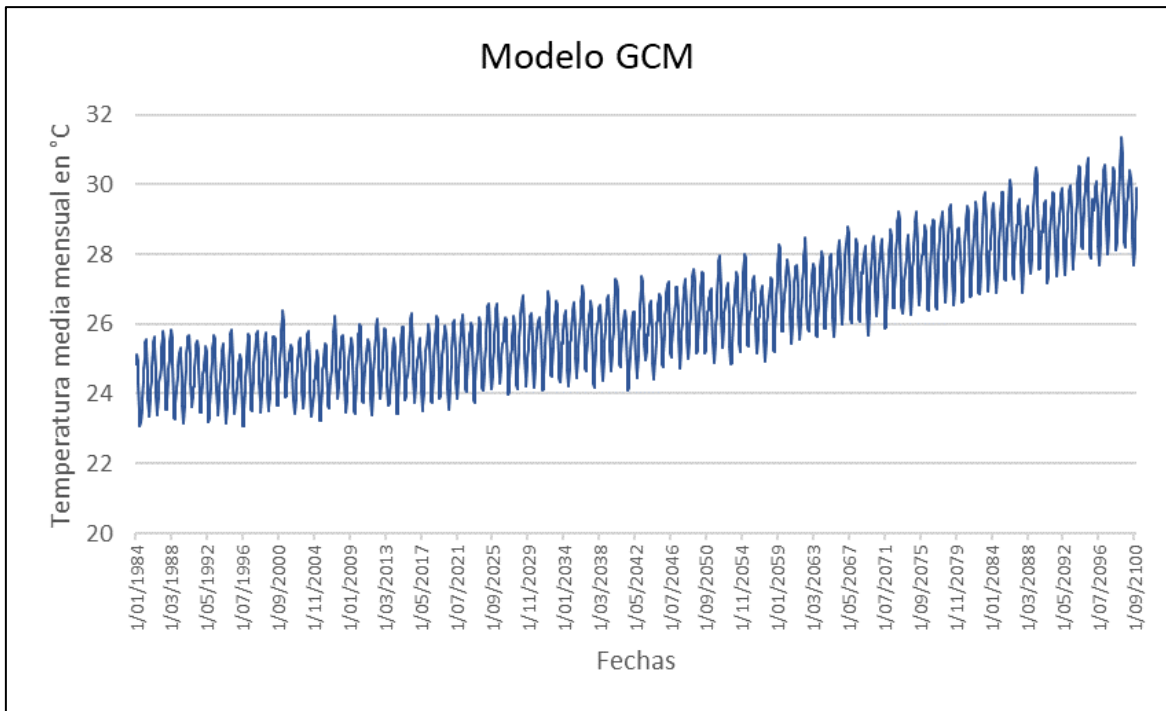


Figura 65: Temperatura mensual CNRM-CM6-1-HR f2

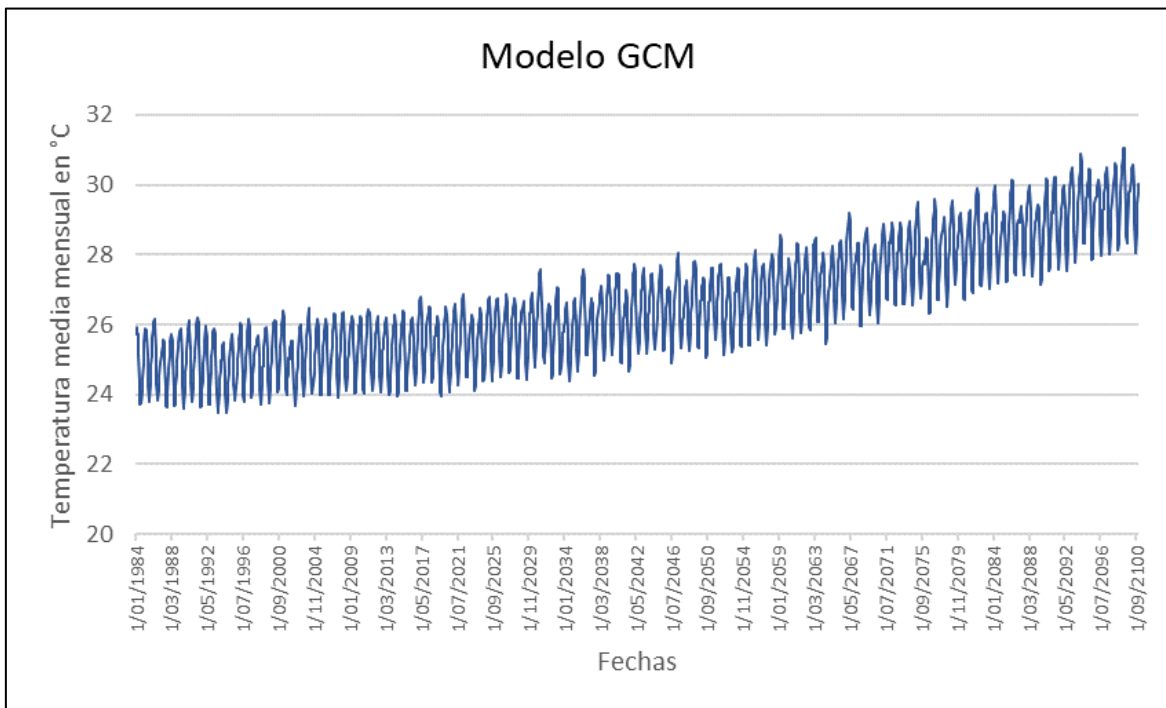


Figura 66: Temperatura mensual CNRM-ESM2-1 f2

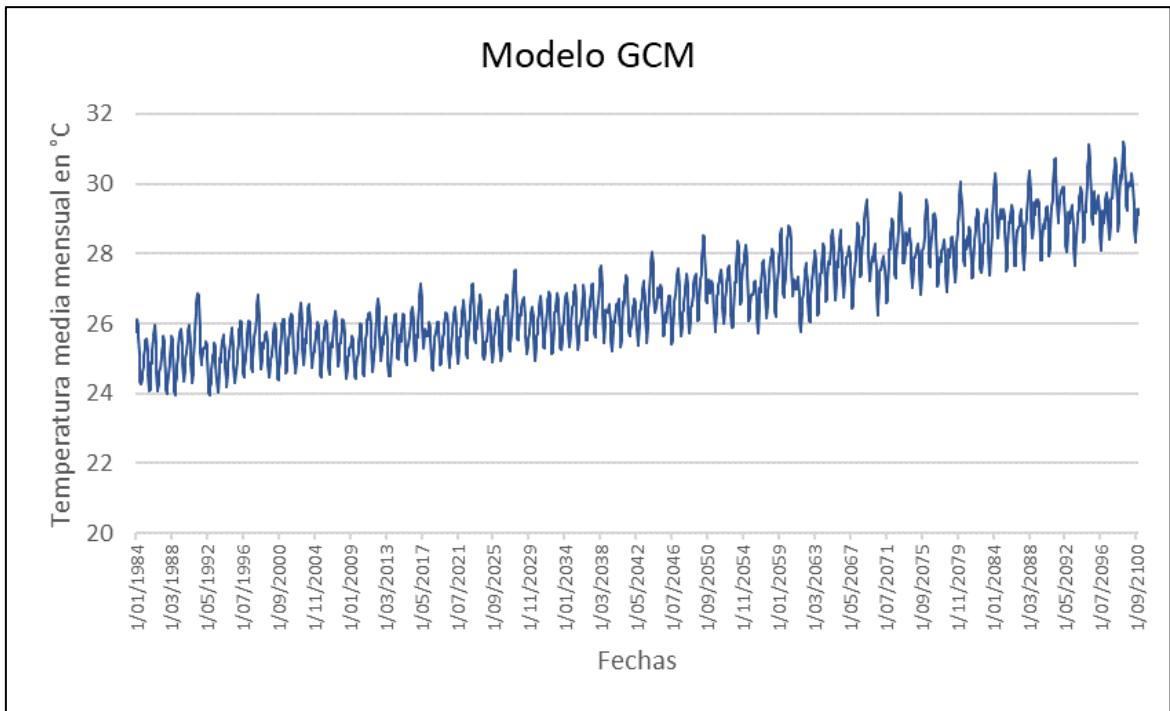


Figura 67: Temperatura mensual EC-Tierra3-Veg

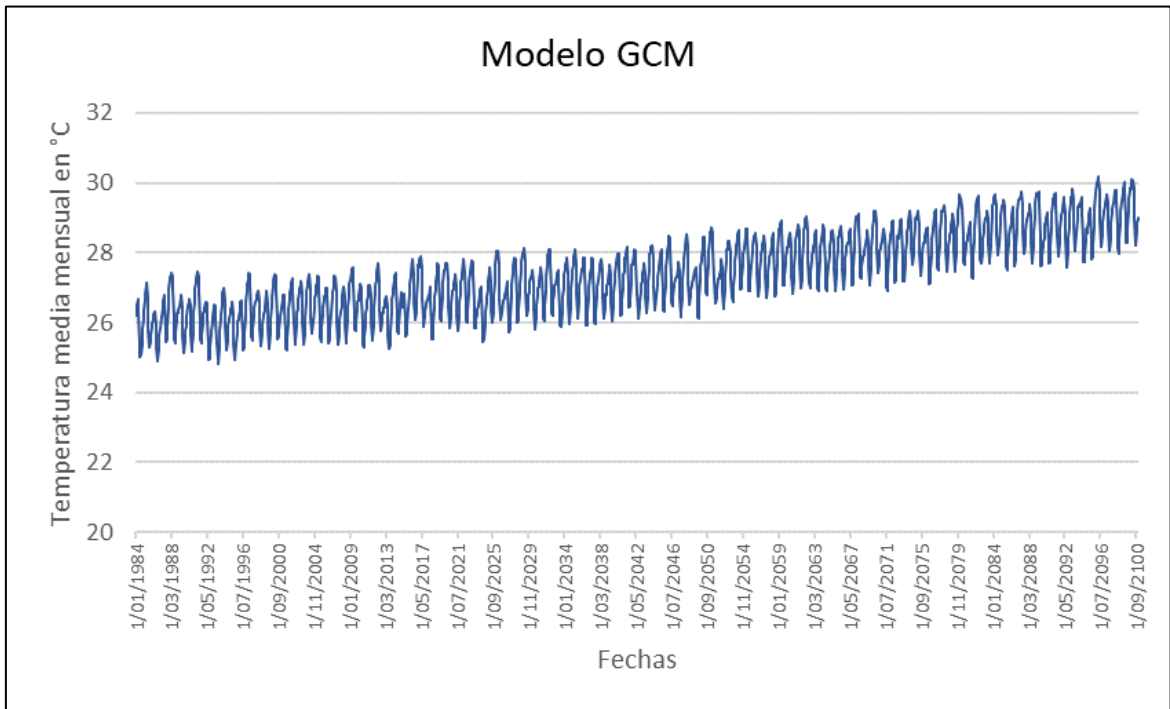


Figura 68: Temperatura mensual FGOLES-g3

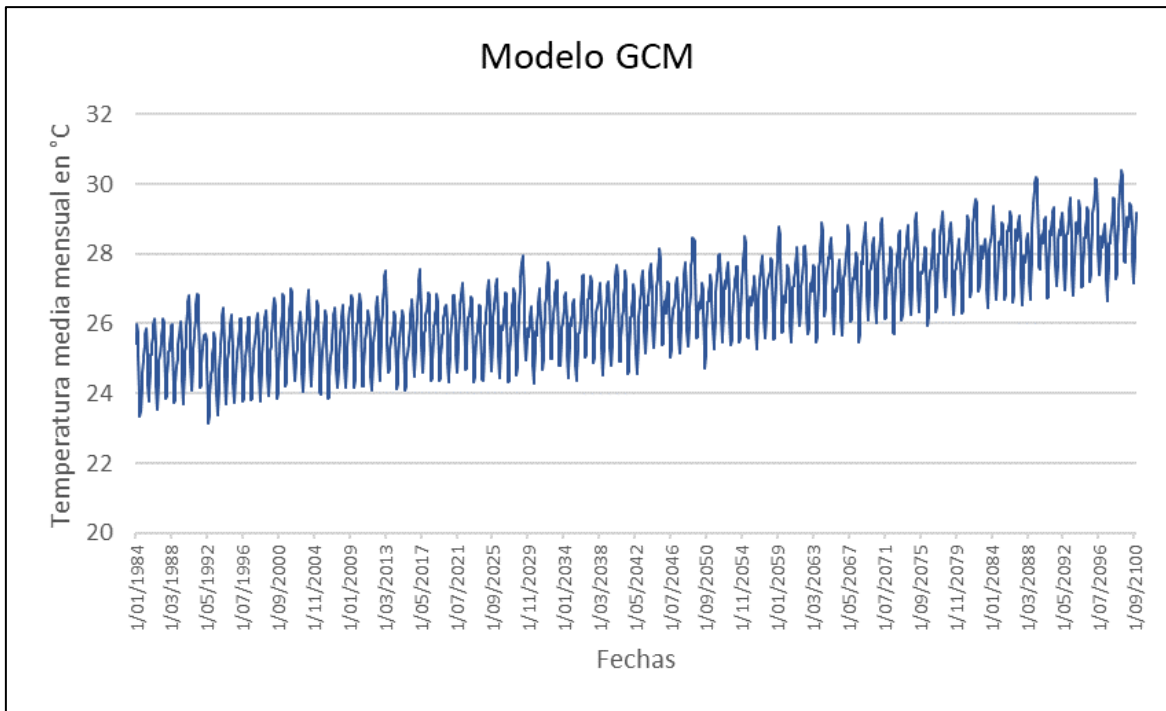


Figura 69: Temperatura mensual GFDL-ESM4

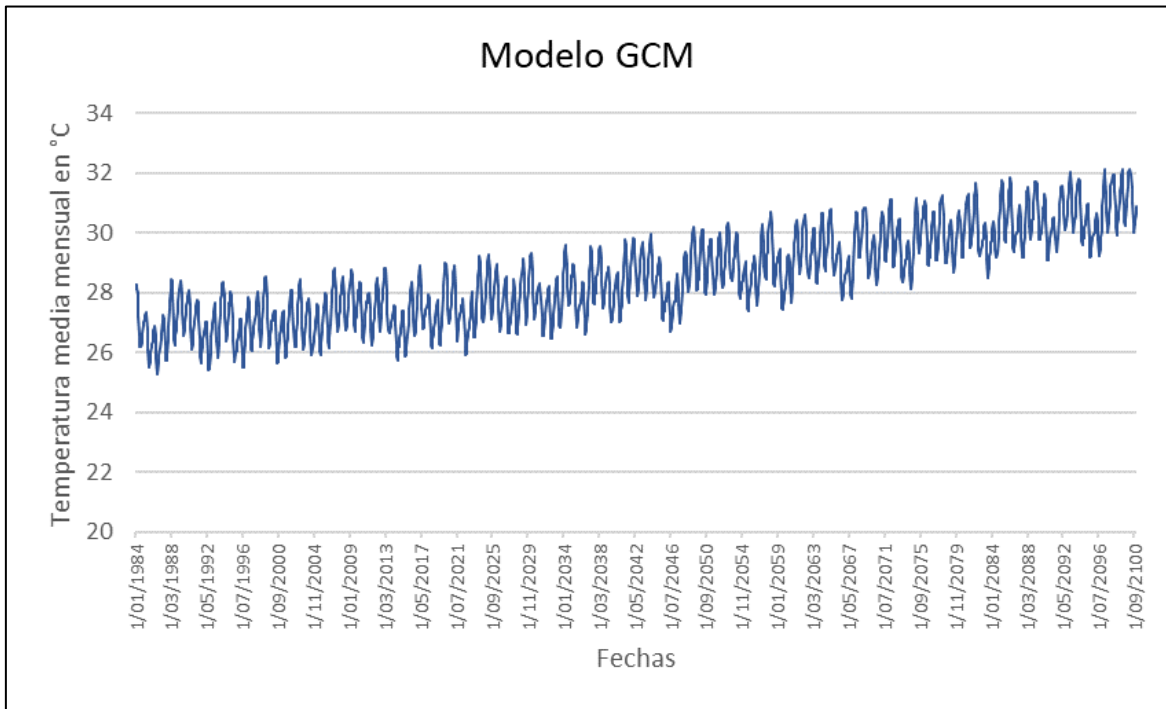


Figura 70: Temperatura mensual GISS-E2-1-G p3

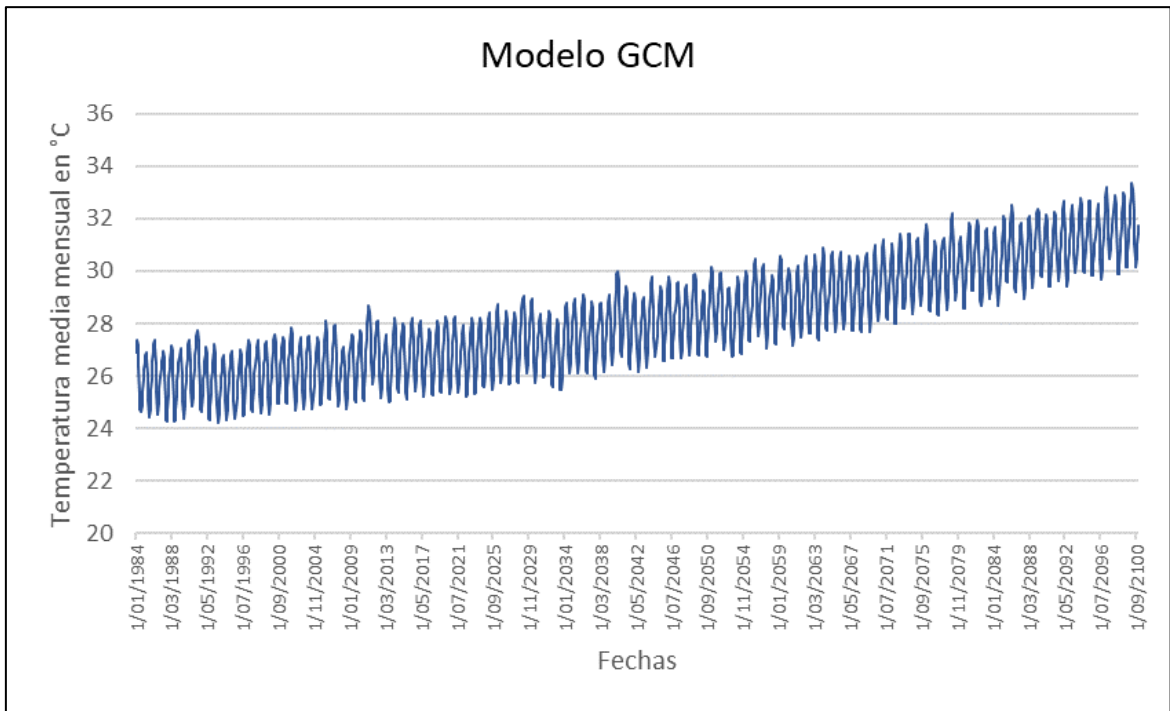


Figura 71: Temperatura mensual HaGEM3-GC31-LL f3

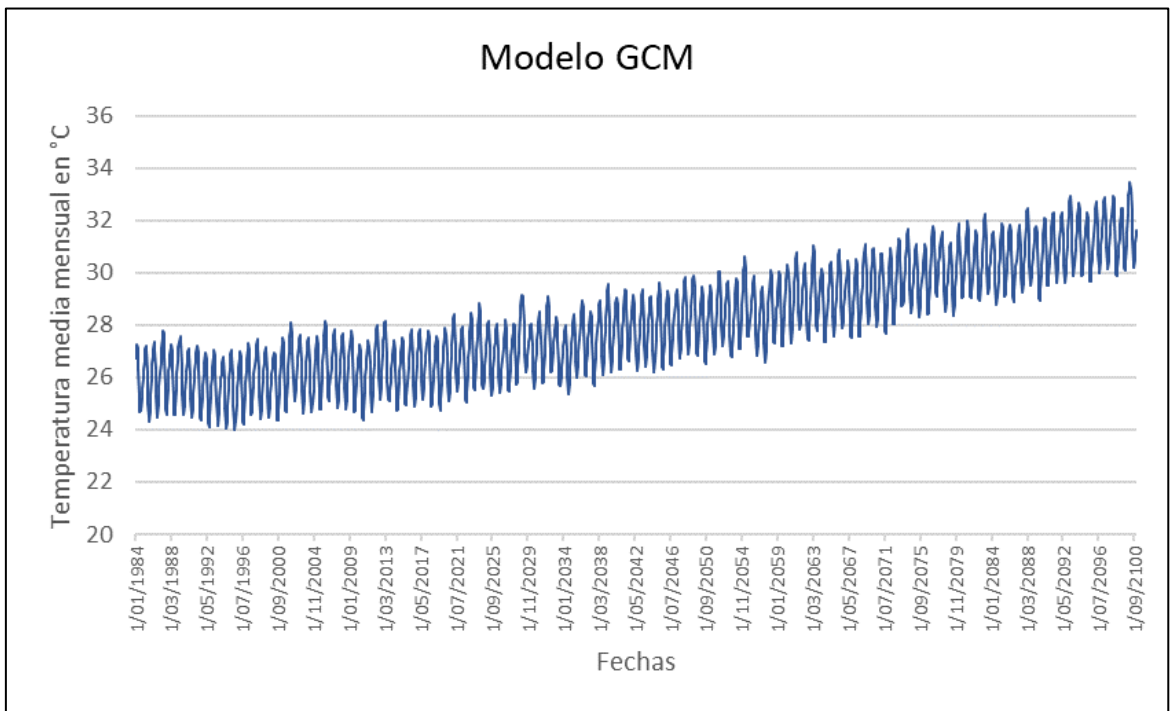


Figura 72: Temperatura mensual HadGEM3-GC31-MM f3

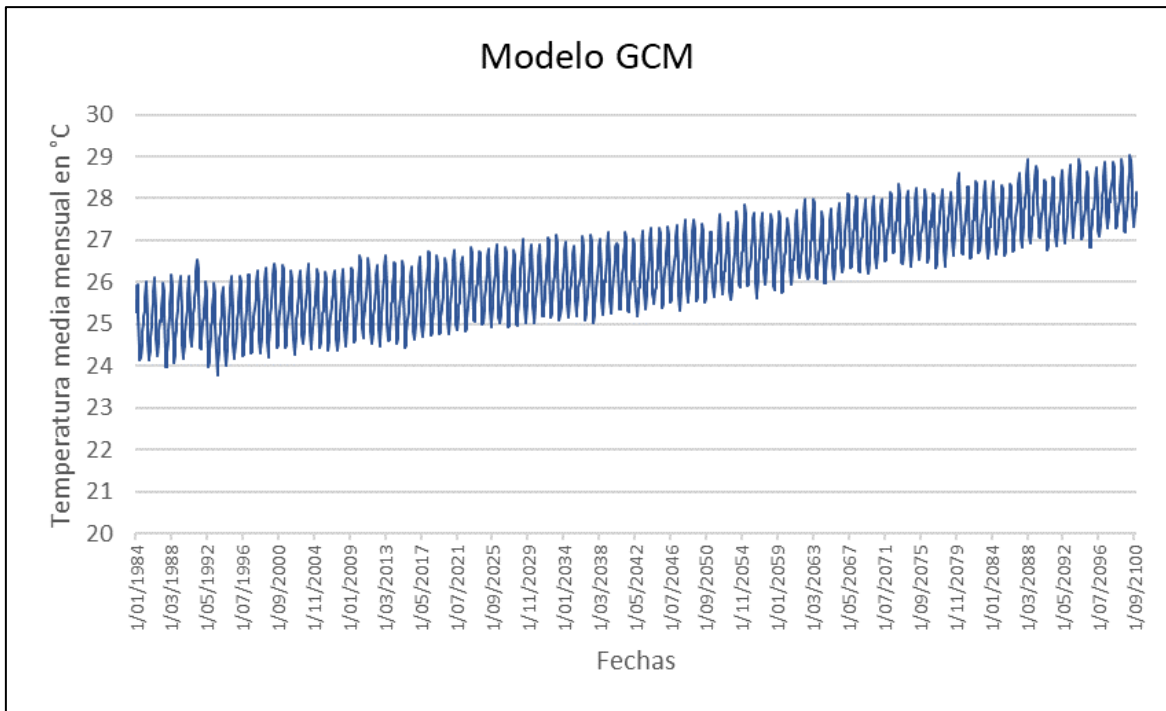


Figura 73: Temperatura mensual INM-CM4-8

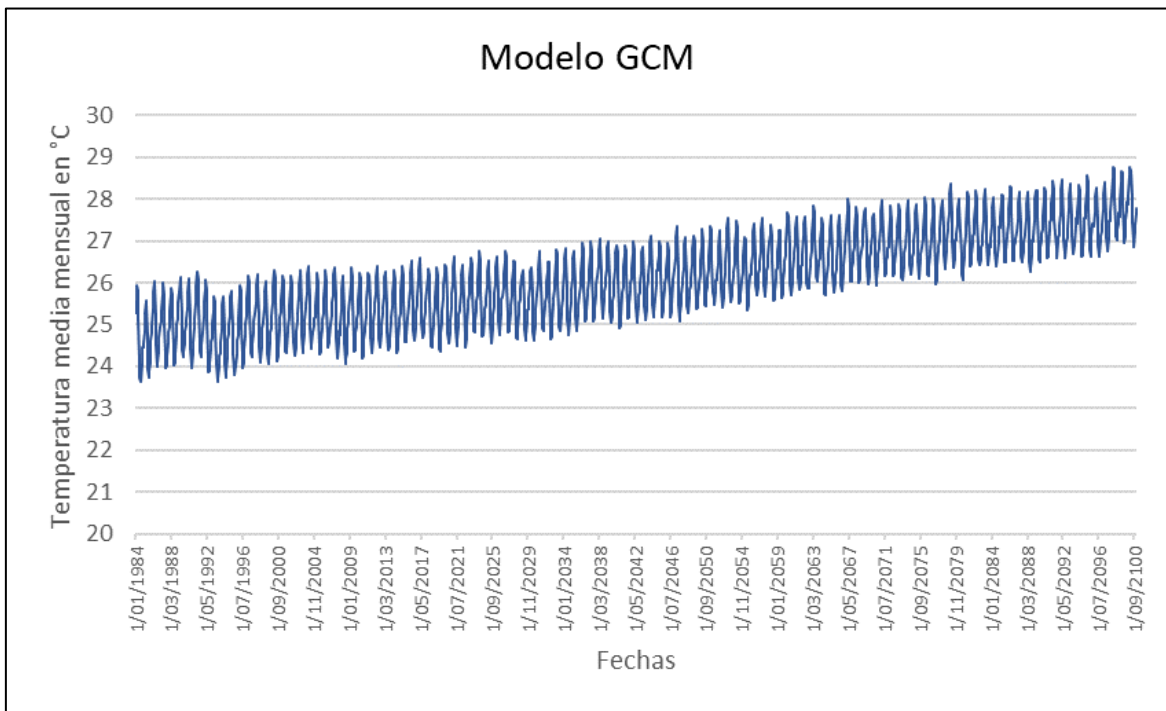


Figura 74: Temperatura mensual INM-CM5-0

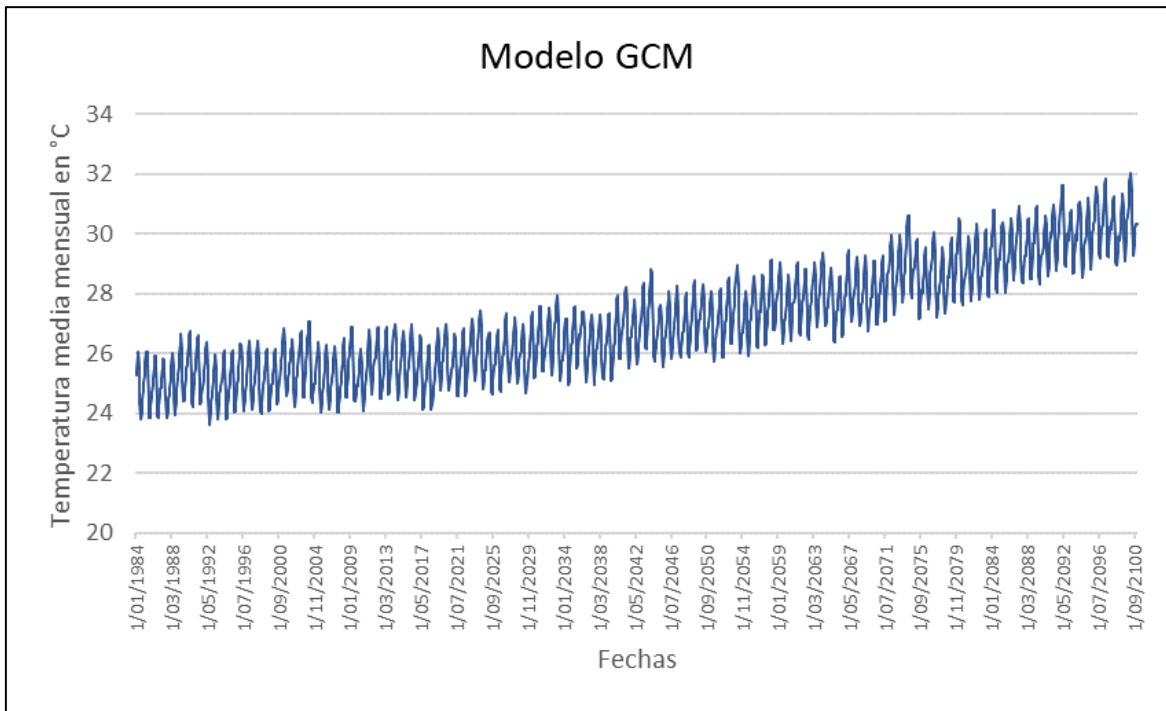


Figura 75: Temperatura mensual IPSL-CM6A-LR

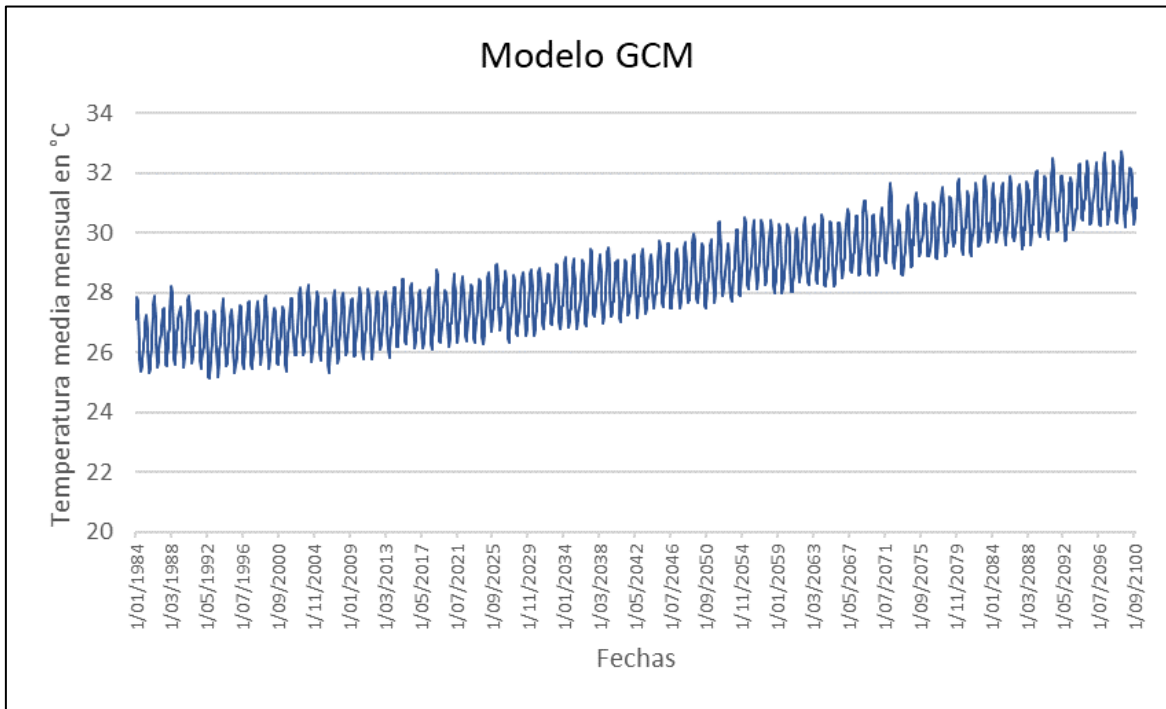


Figura 76: Temperatura mensual KACE-1-0-G

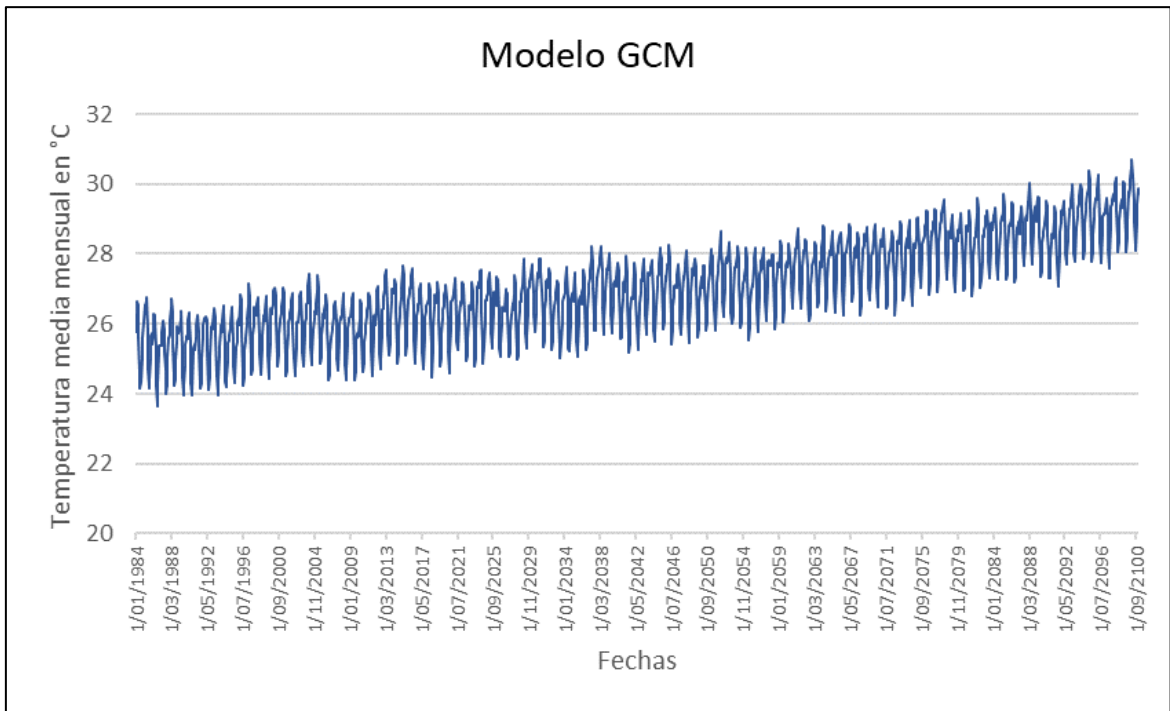


Figura 77: Temperatura mensual MCM-UA-1-0

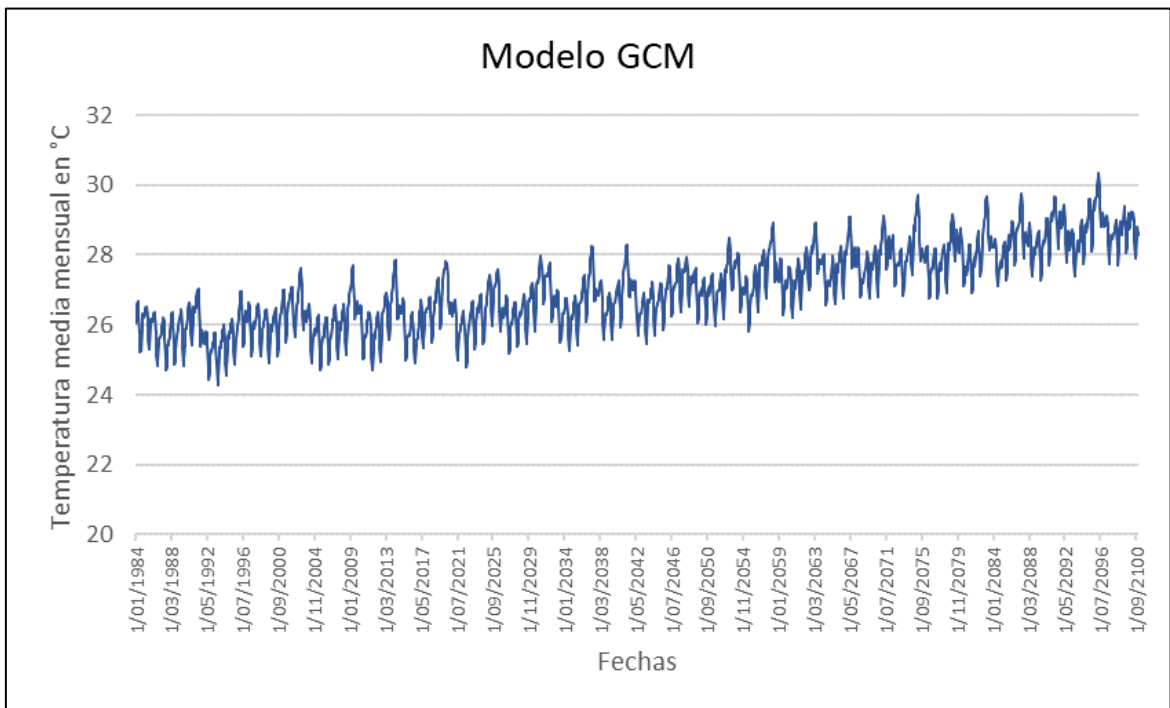


Figura 78: Temperatura mensual MIROC6

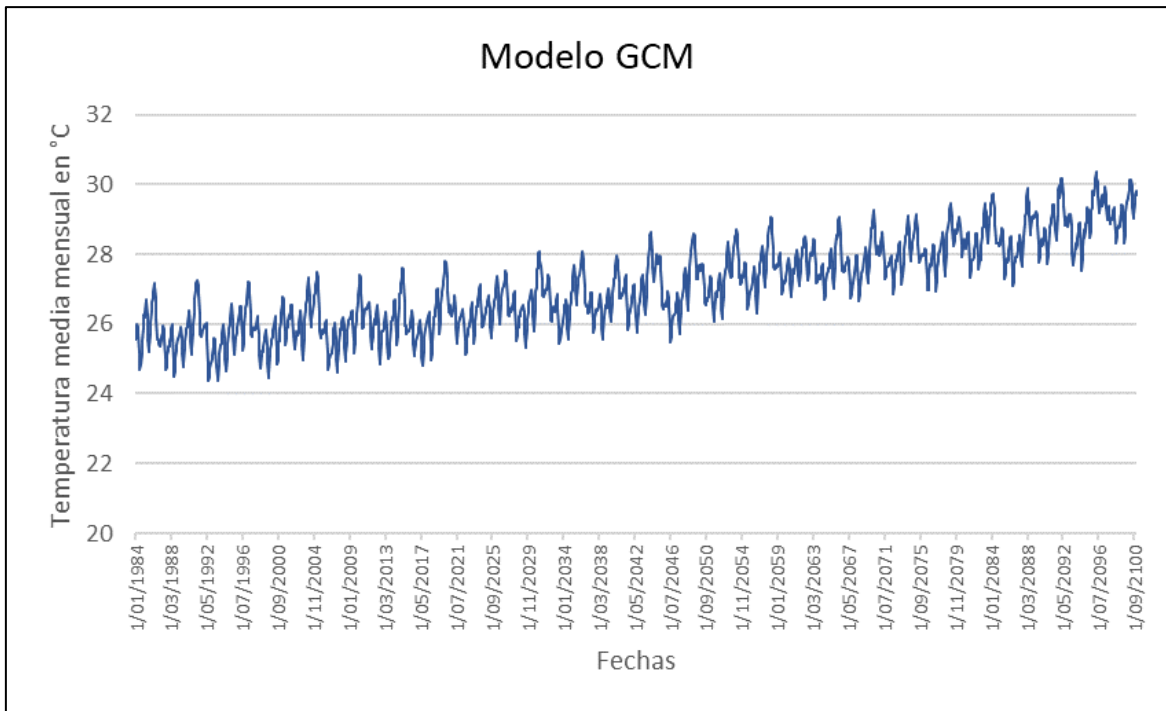


Figura 79: Temperatura mensual MIROC-ES2L f2

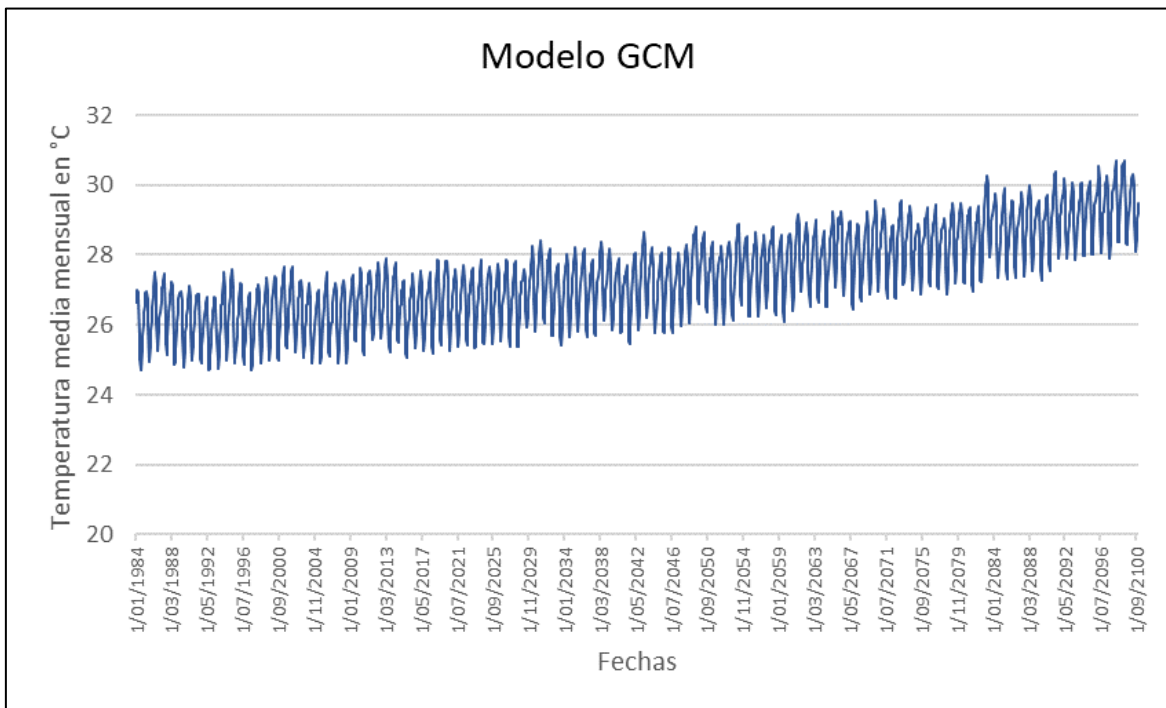


Figura 80: Temperatura mensual MPI-ESM1-2-HR

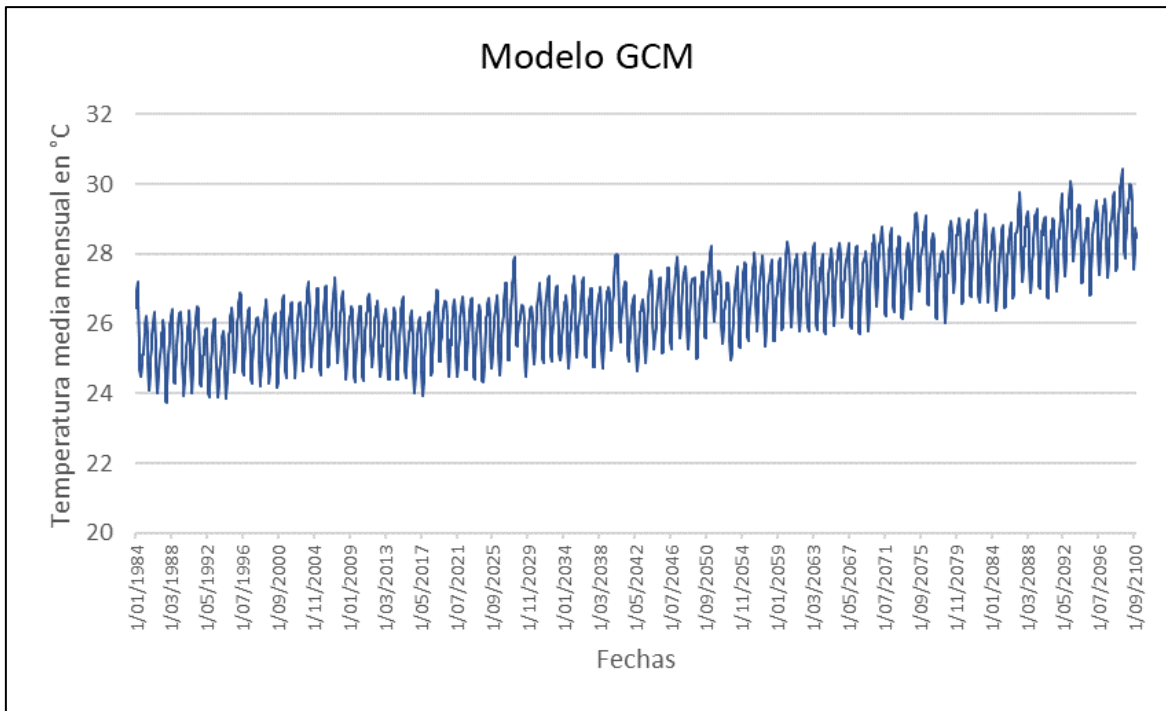


Figura 81: Temperatura mensual MPI-ESM1-2-LR

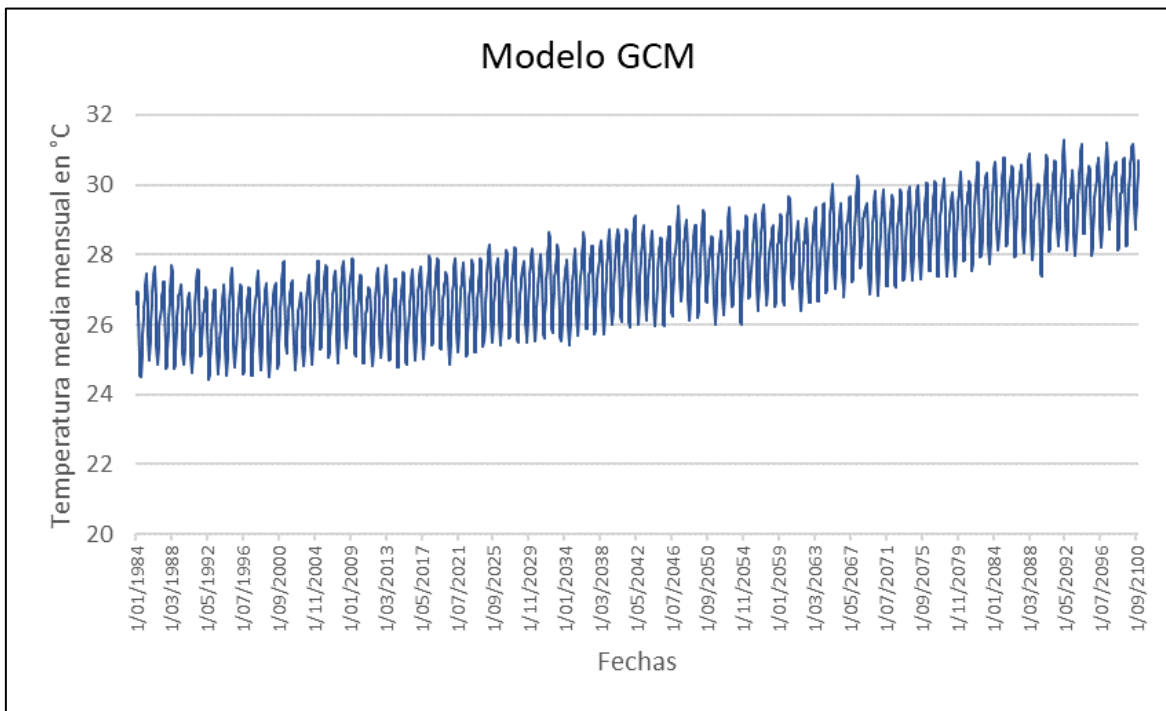


Figura 82: Temperatura mensual MRI-ESM2-0

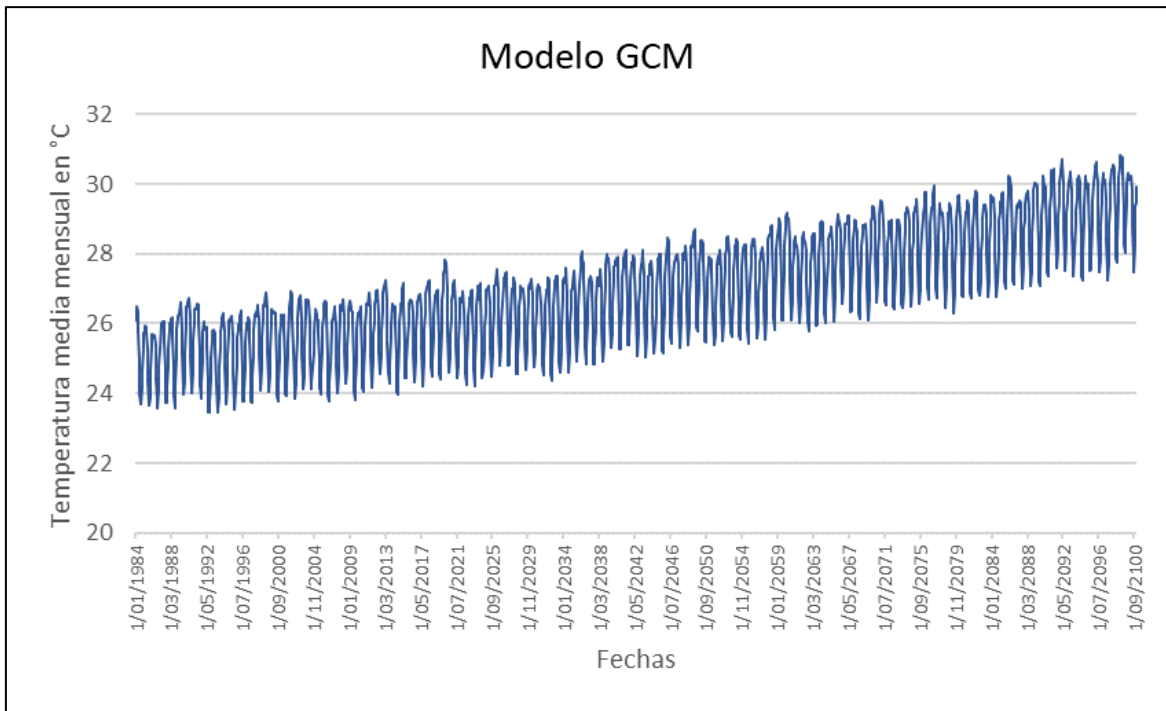


Figura 83: Temperatura mensual NESM3

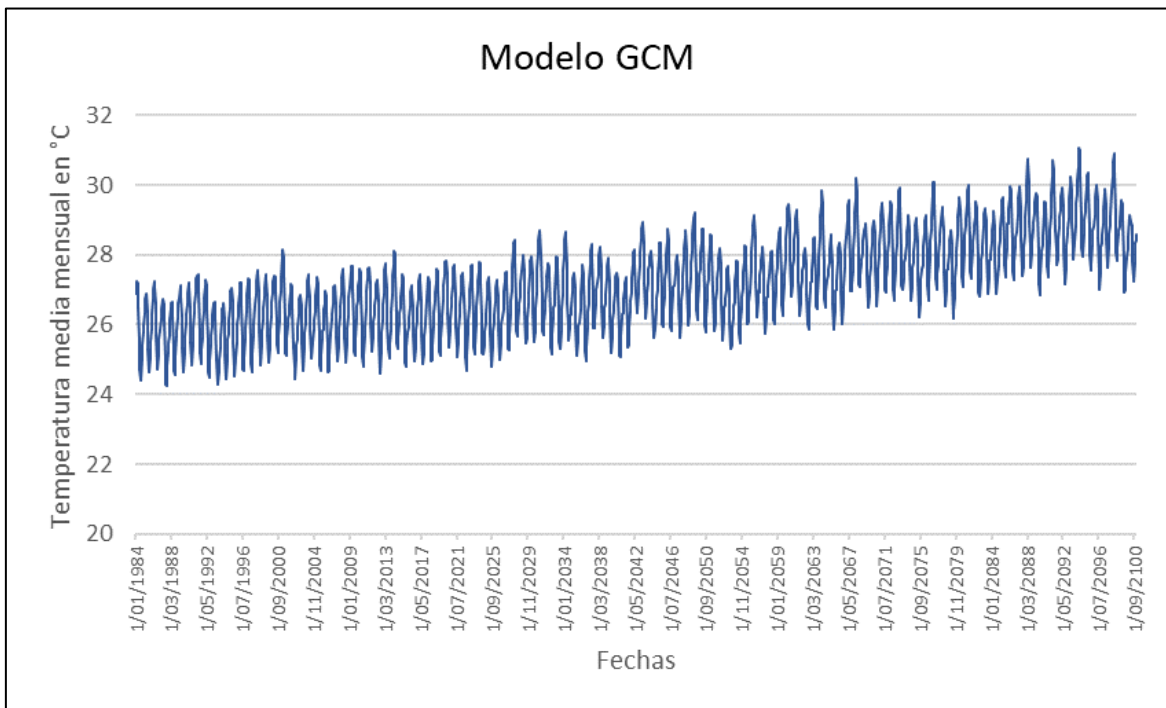


Figura 84: Temperatura mensual NorESM2-LM

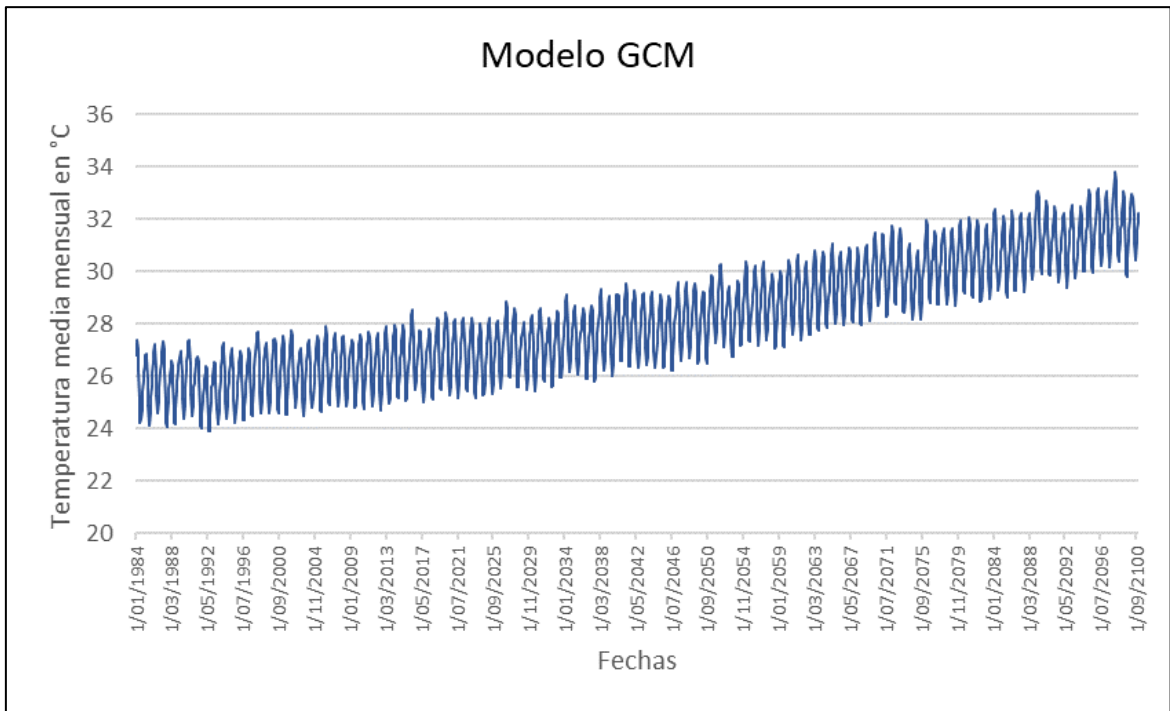


Figura 85: Temperatura mensual UKESM1-0-LL f2

Anexo 2: Modelos GCM de la variable de precipitación

A continuación, en la Figura 86 a la Figura 115, se presenta de las series de precipitación mensual del año 1984 al año 2100 de cada modelo de GCM.

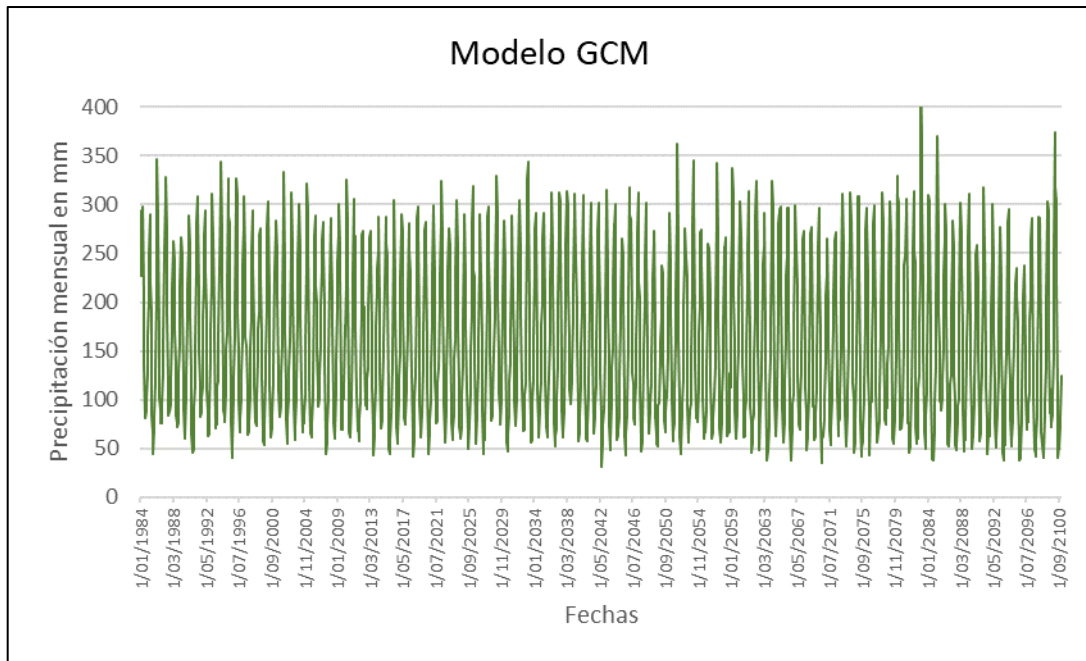


Figura 86: Precipitación mensual de GCM ACCESO-CM2

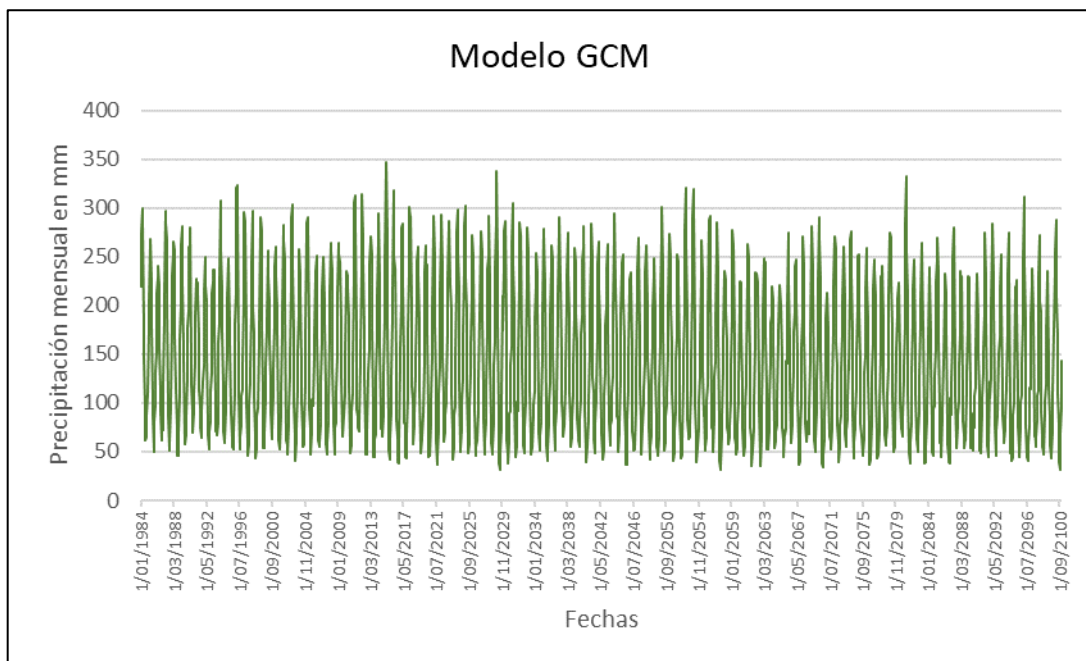


Figura 87: Precipitación mensual de GCM ACCESO-ESM1-5

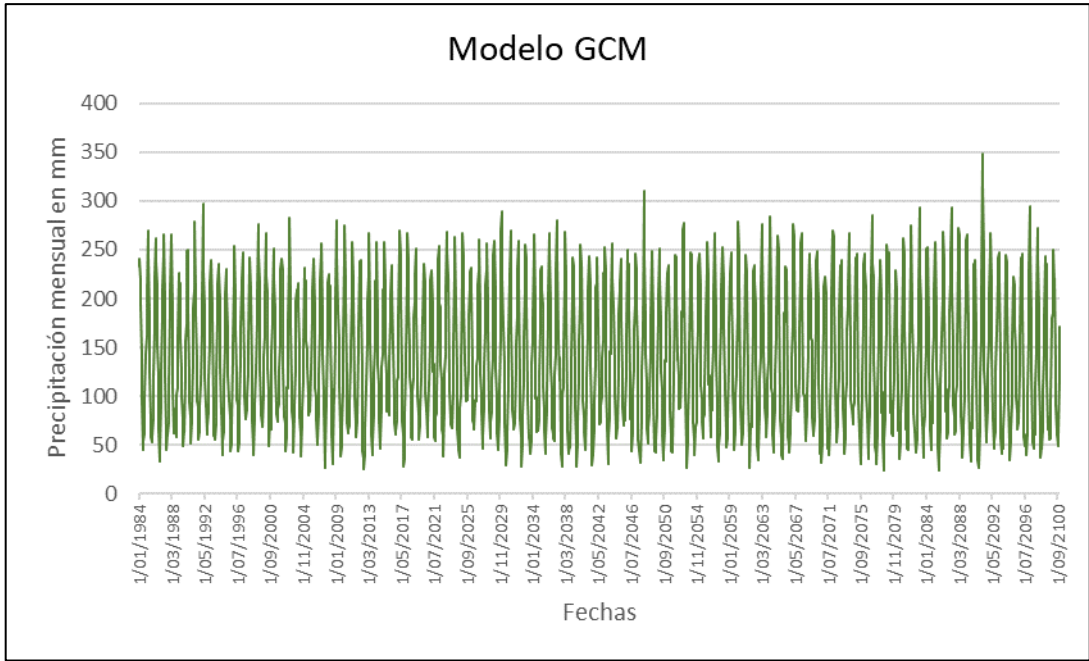


Figura 88: Precipitación mensual de GCM AWI-CM-1-1-MR

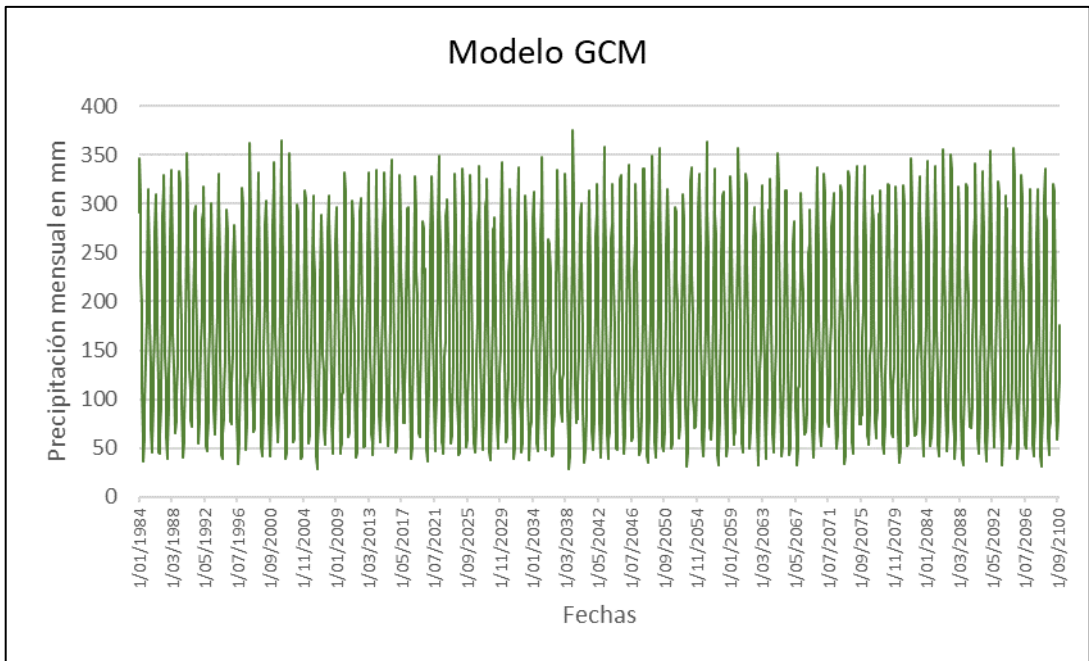


Figura 89: Precipitación mensual de GCM BCC-CSM2-MR

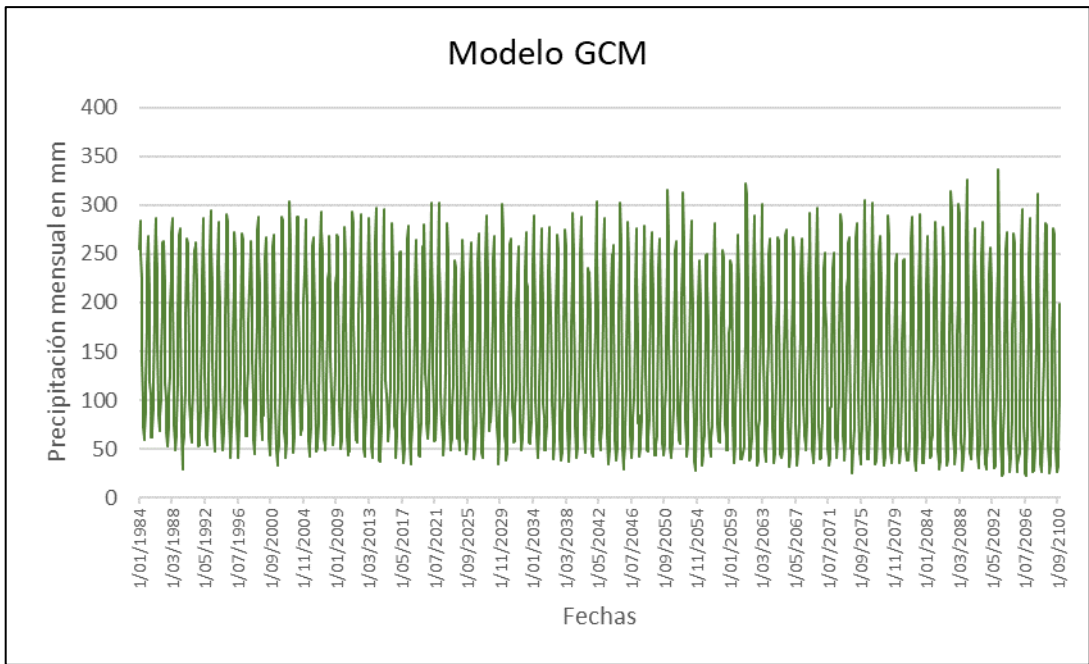


Figura 90: Precipitación mensual de GCM CanESM5 p1

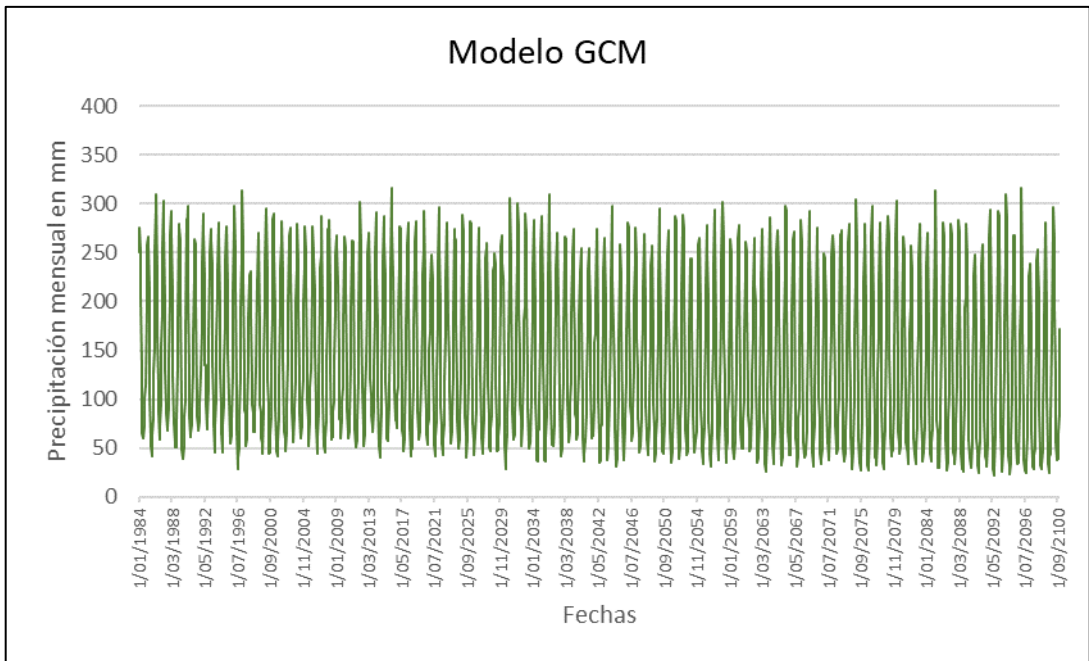


Figura 91: Precipitación mensual de GCM CanESM5-CanOE p2

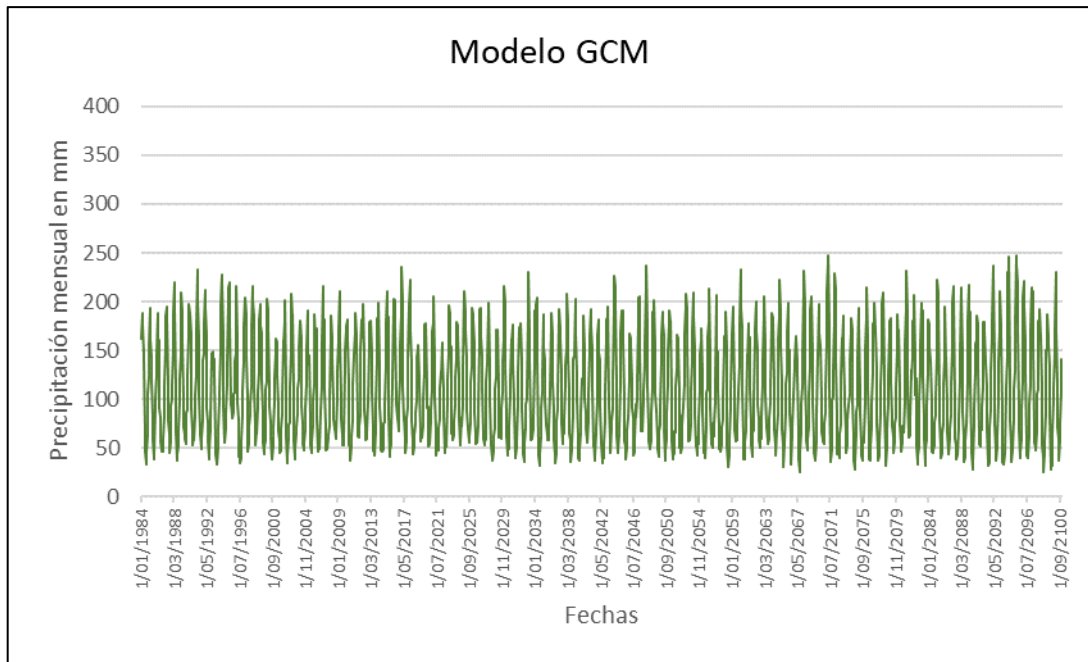


Figura 92: Precipitación mensual de GCM CESM2

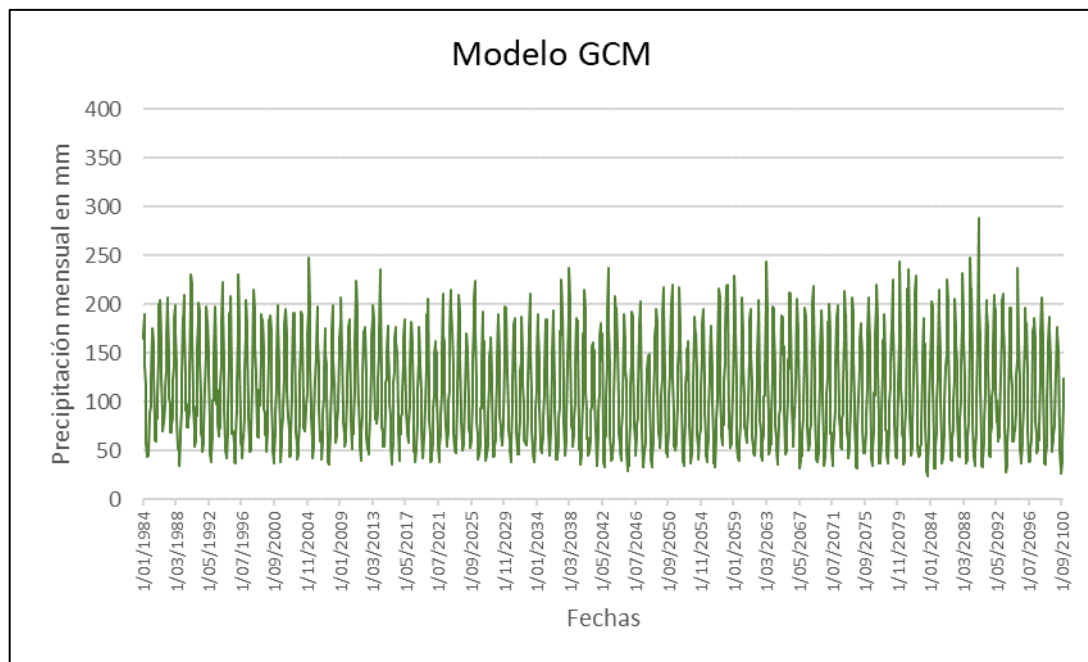


Figura 93: Precipitación mensual de GCM CESM2-WACCM

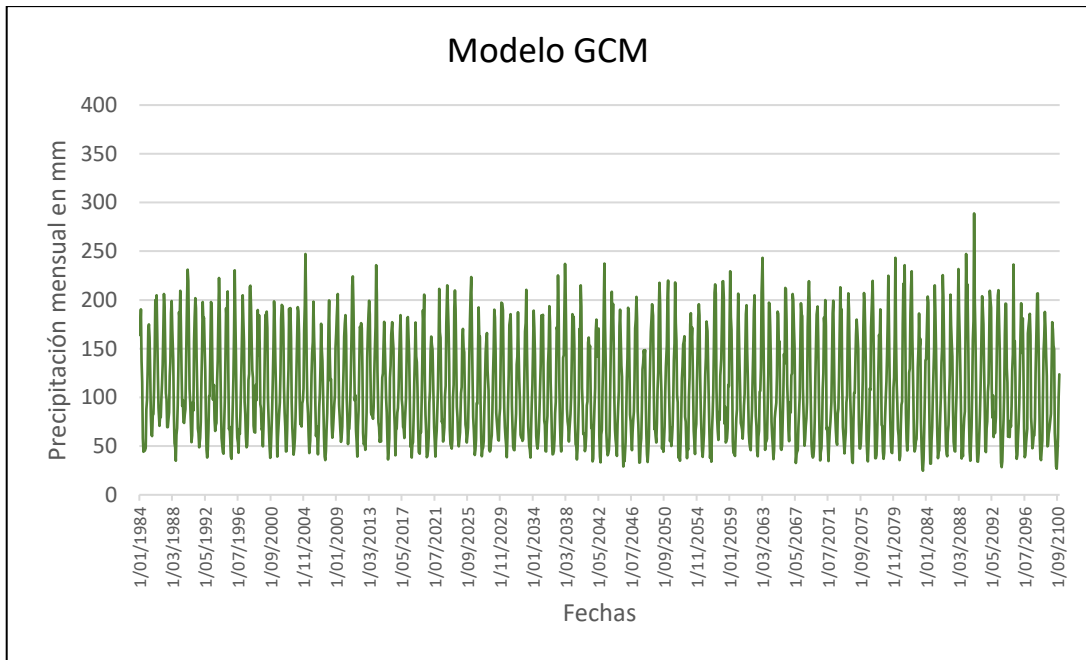


Figura 94: Precipitación mensual de GCM CIESM

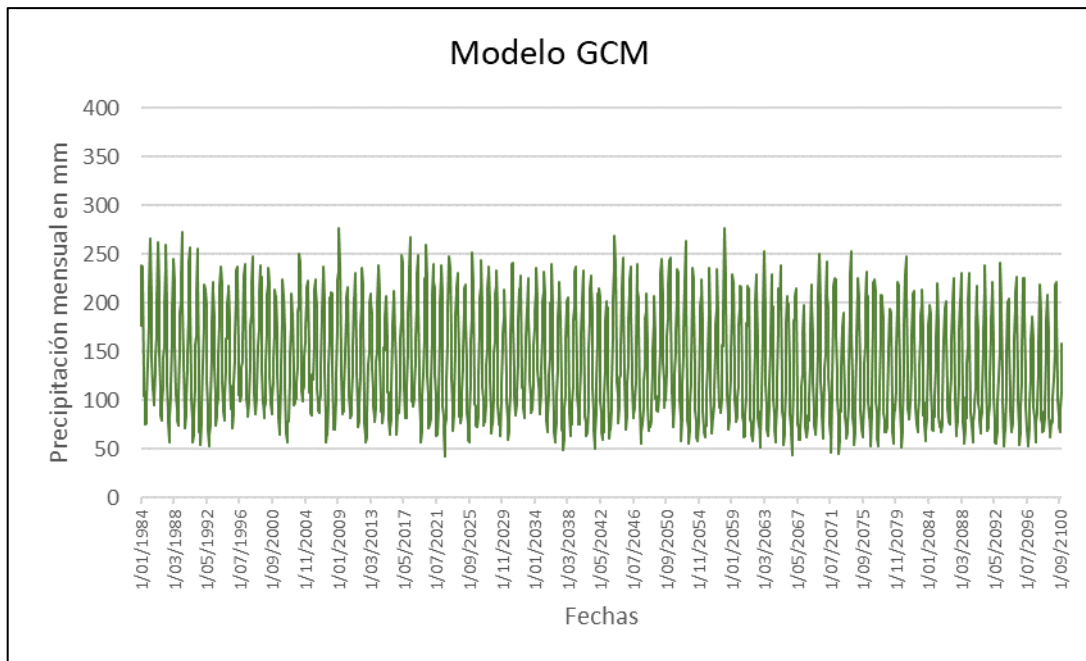


Figura 95: Precipitación mensual de GCM CMCC-CM2-SR5

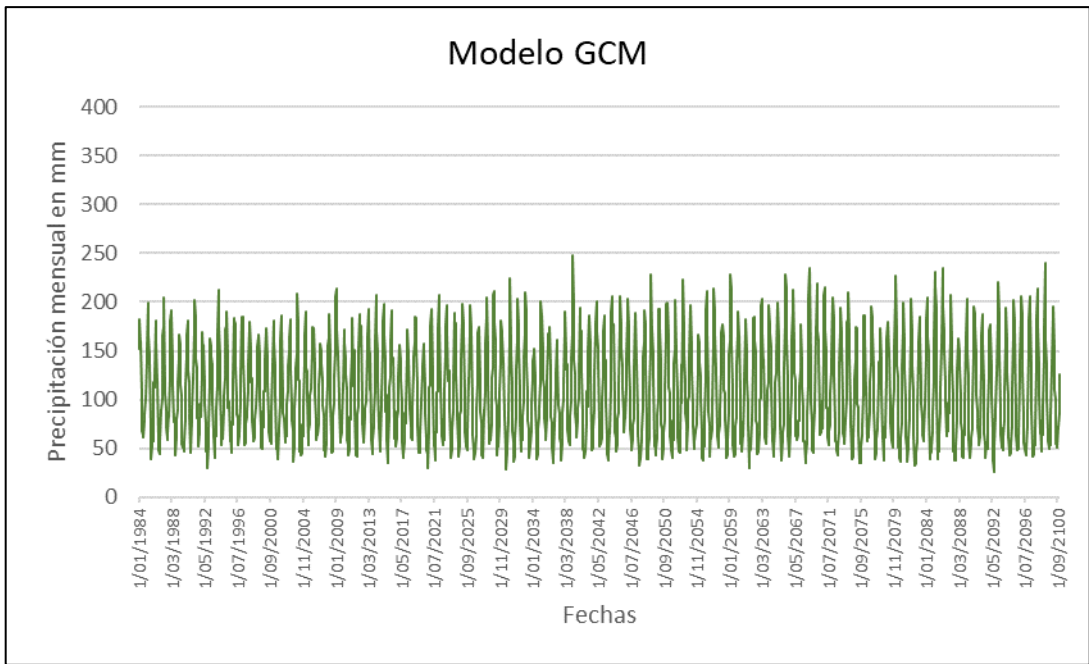


Figura 96: Precipitación mensual de GCM CNRM-CM6-1-HR f2

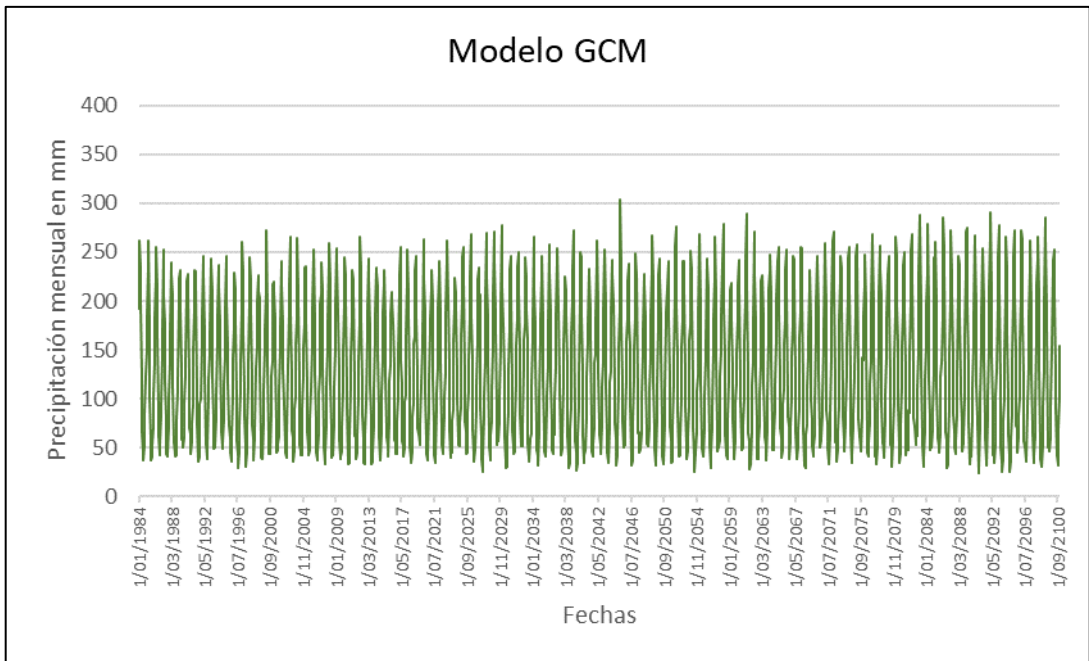


Figura 97: Precipitación mensual de GCM CNRM-ESM2-1 f2

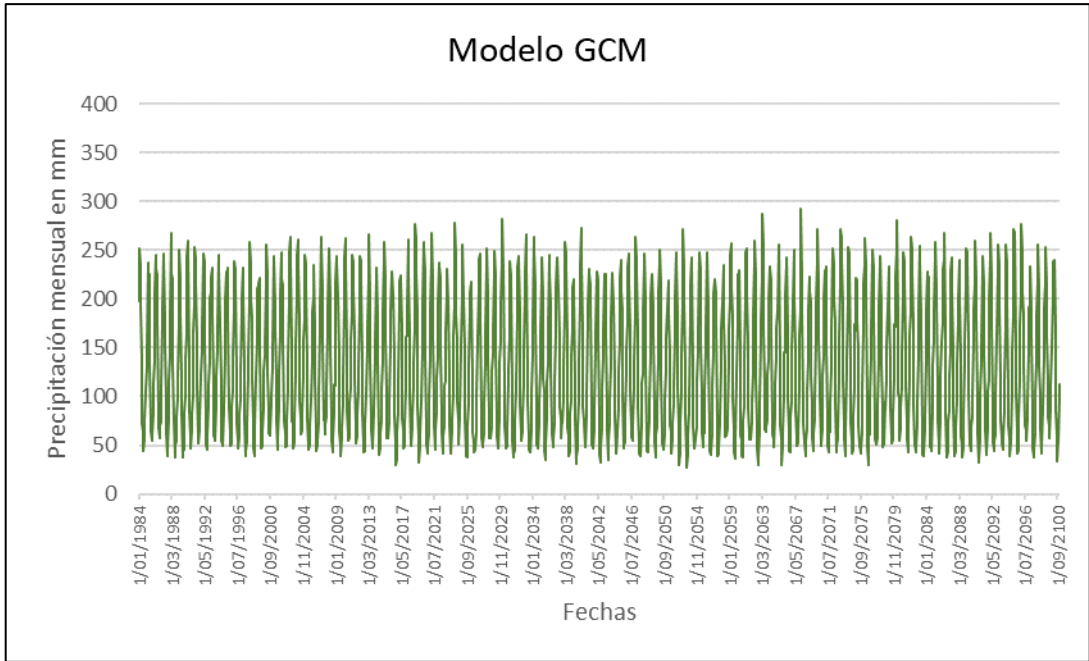


Figura 98 Precipitación mensual de GCM EC-Earth3-Veg

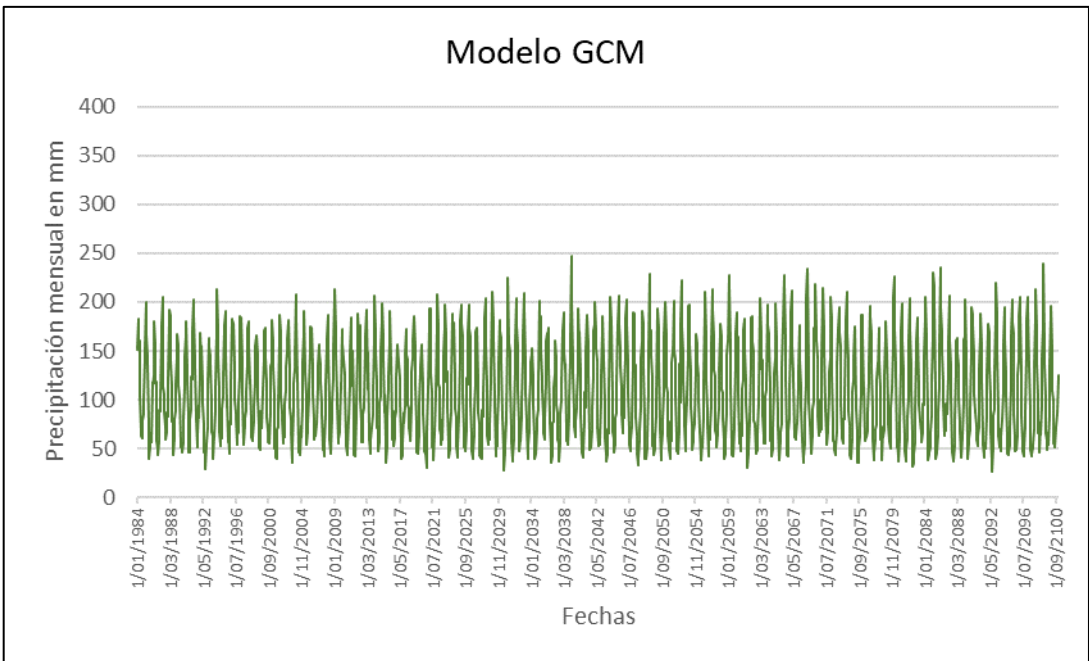


Figura 99 Precipitación mensual de GCM FGOLES-f3-L

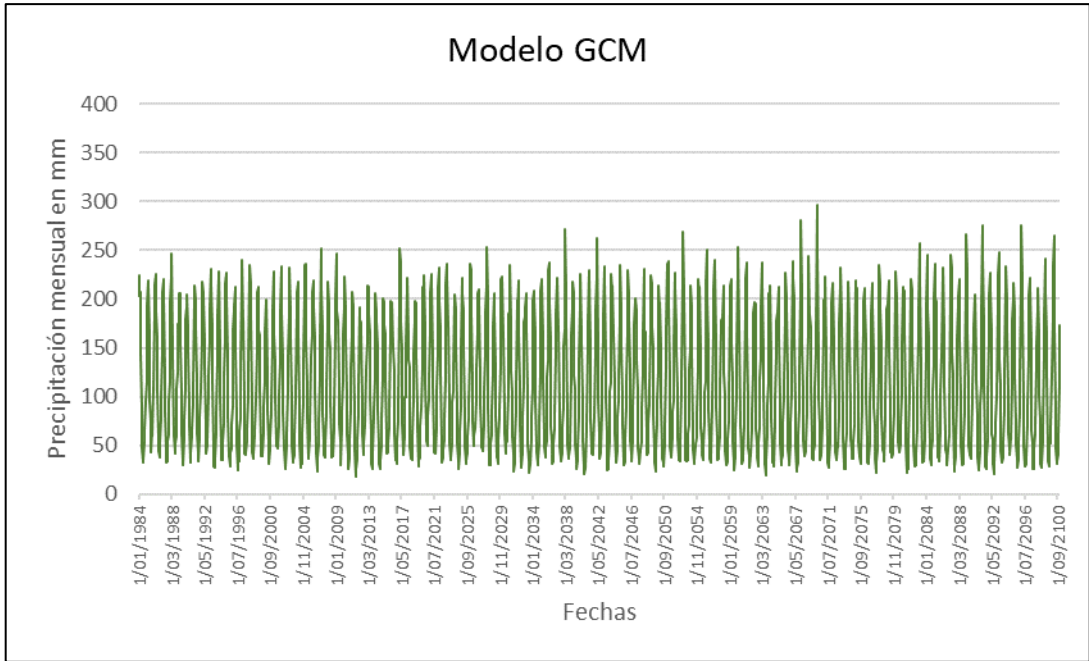


Figura 100: Precipitación mensual de GCM FGOALS-g3

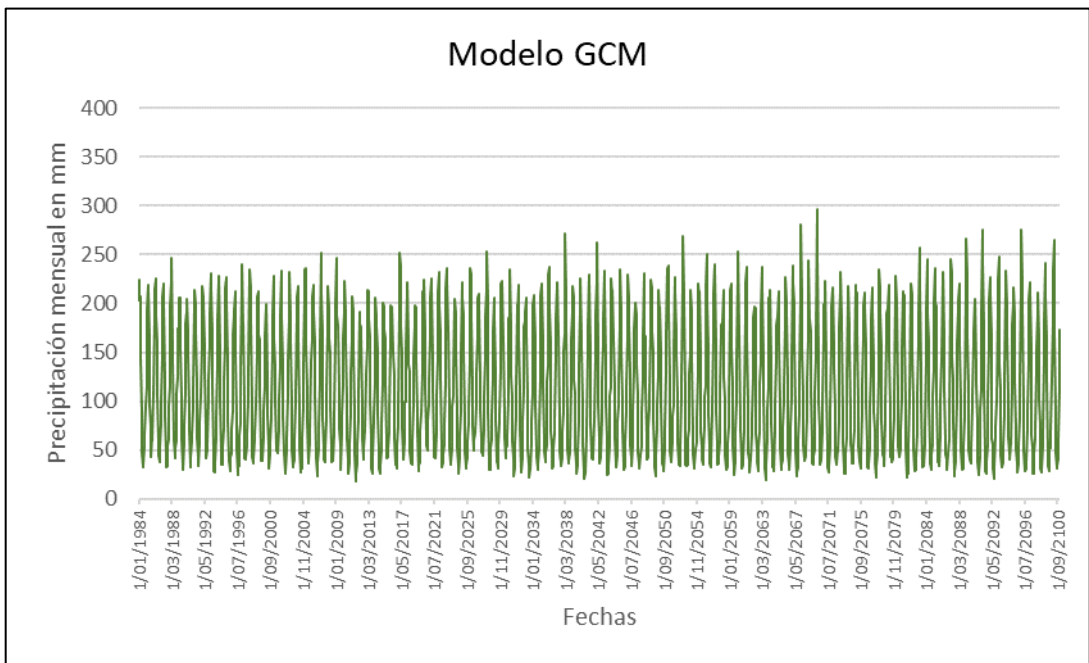


Figura 101: Precipitación mensual de GCM FIO-ESM-2-0

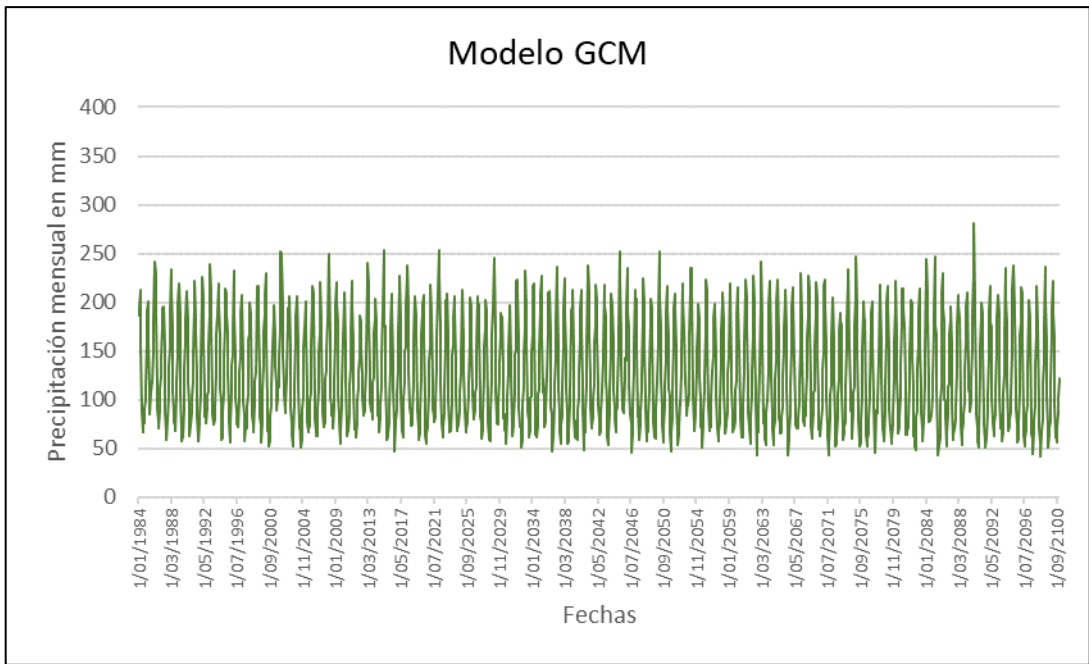


Figura 102: Precipitación mensual de GCM GFDL-ESM4

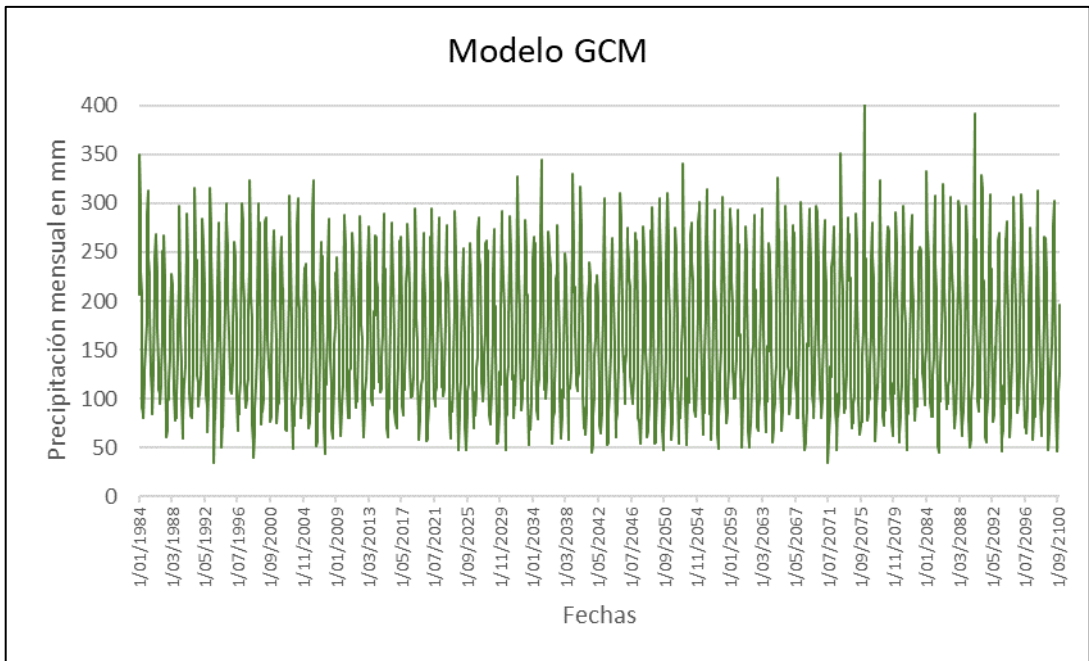


Figura 103: Precipitación mensual de GCM GISS-E2-1-G p3

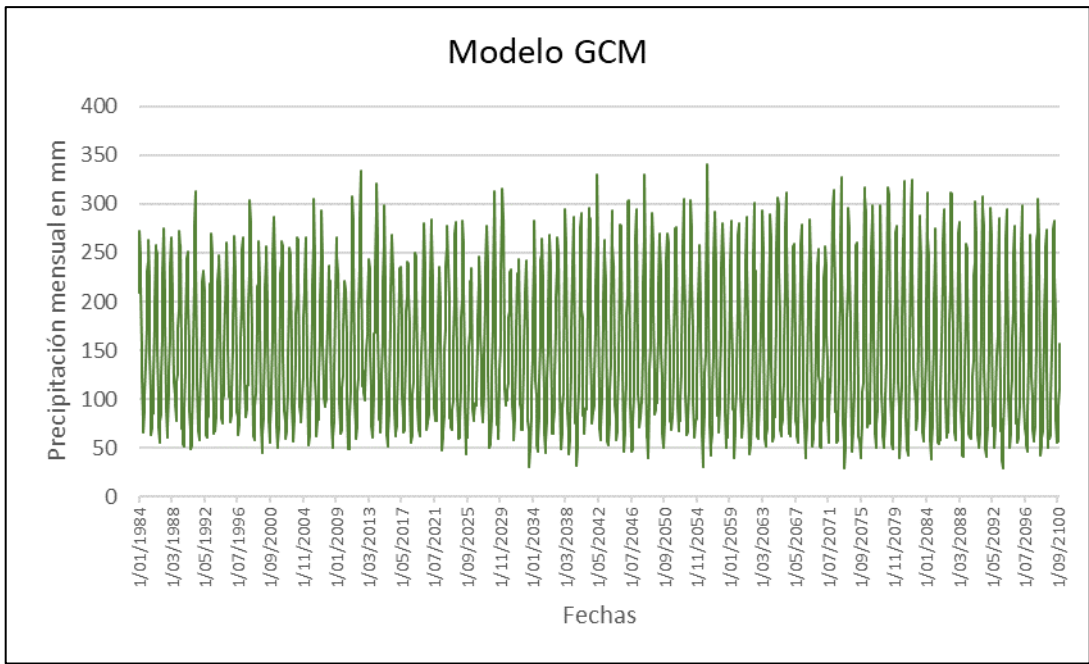


Figura 104: Precipitación mensual de GCM HaGEM3-GC31-LL f3

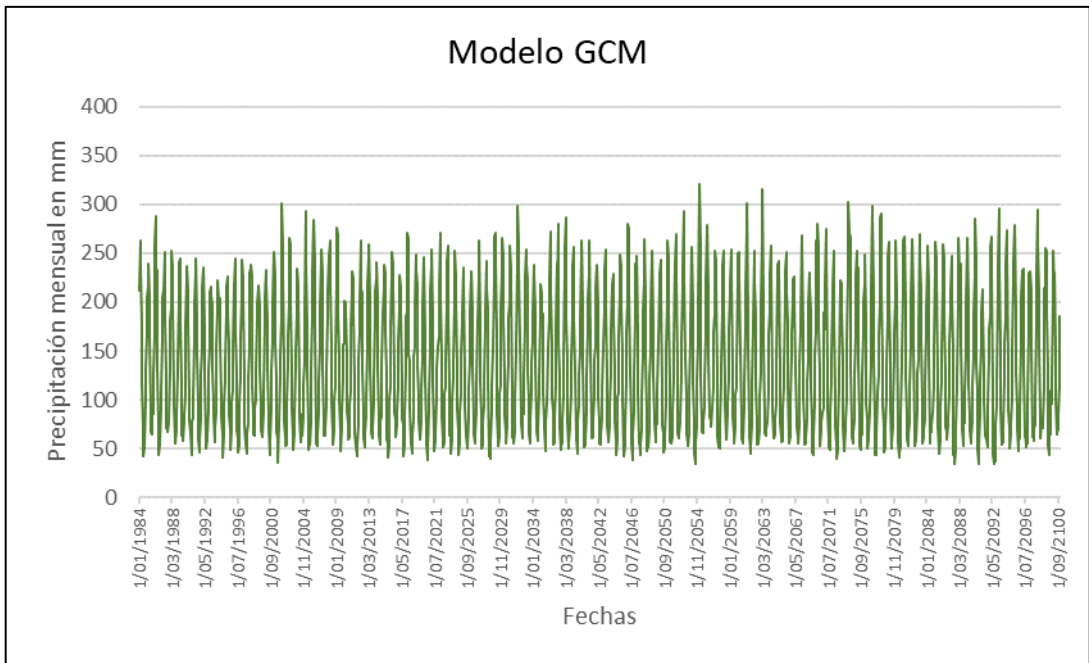


Figura 105: Precipitación mensual de GCM HadGEM3-GC31-MM f3

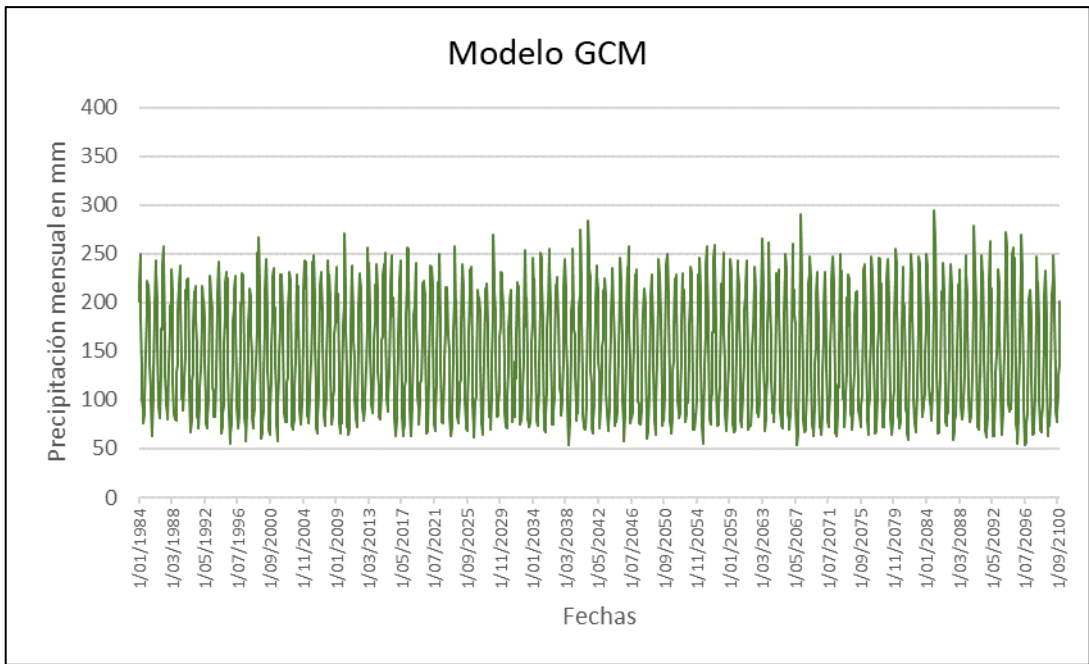


Figura 106: Precipitación mensual de GCM INM-CM4-8

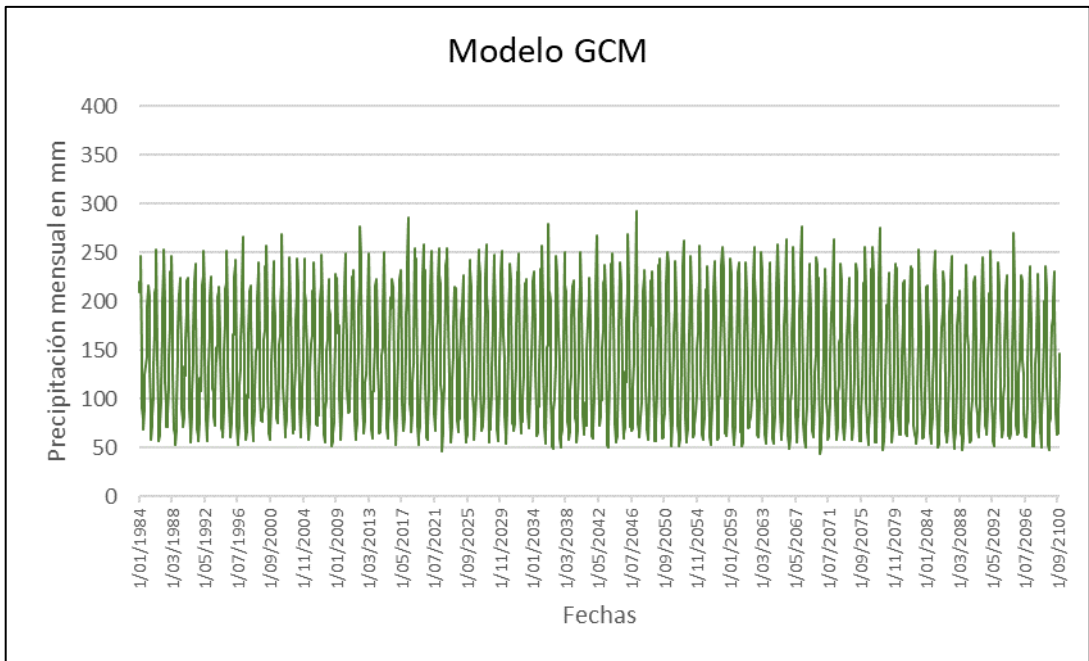


Figura 107: Precipitación mensual de GCM NM-CM5-0

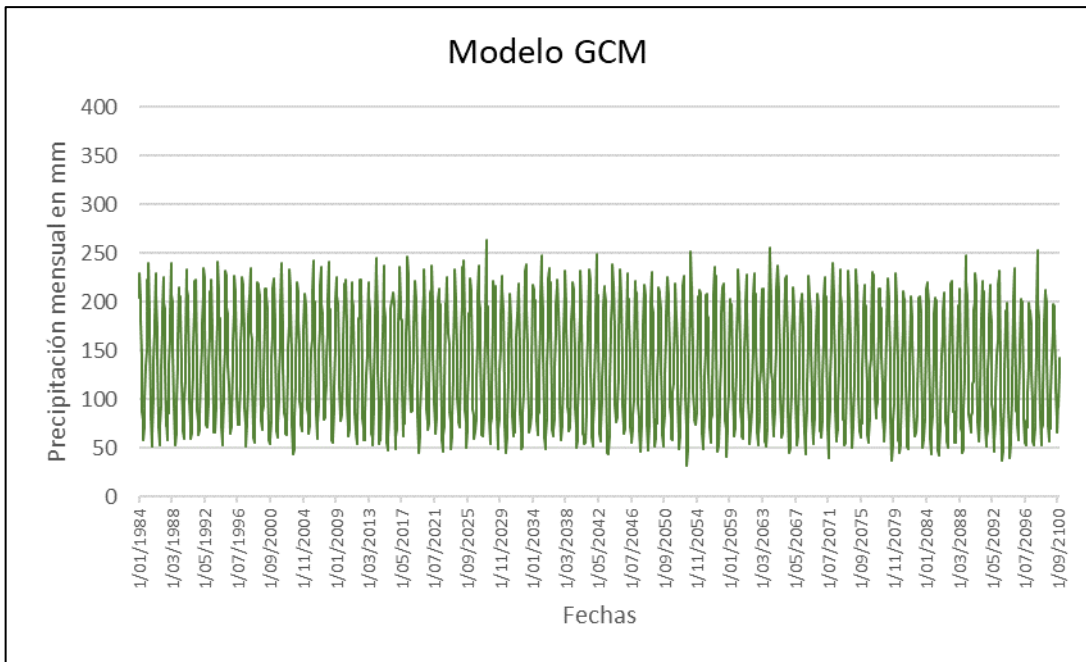


Figura 108: Precipitación mensual de GCM IPSL-CM6A-LR

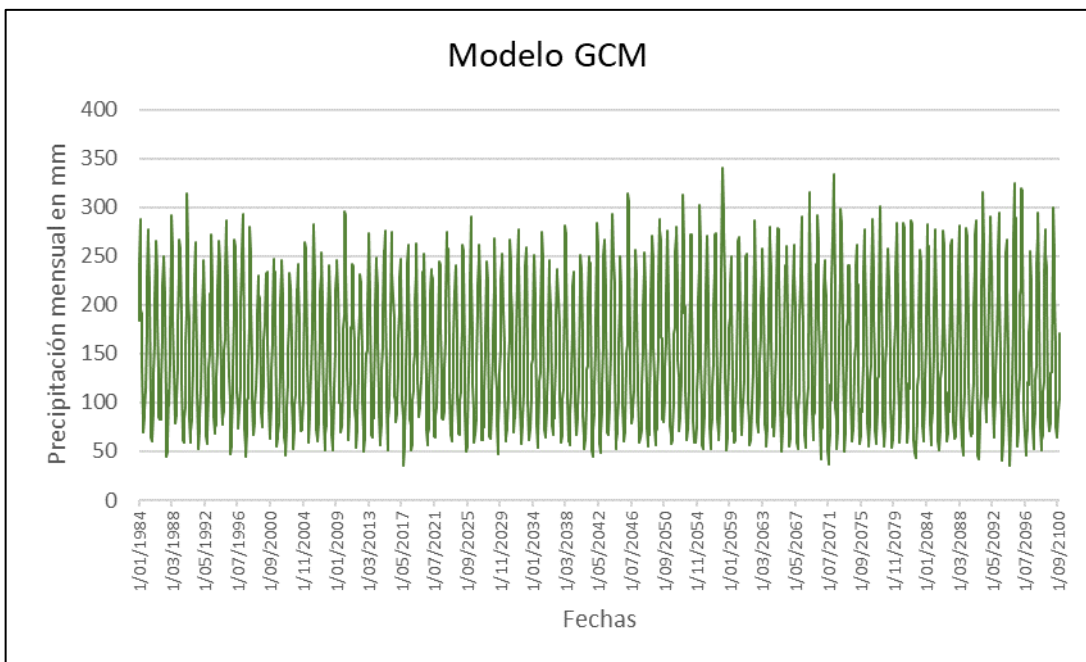


Figura 109: Precipitación mensual de GCM KACE-1-0-G

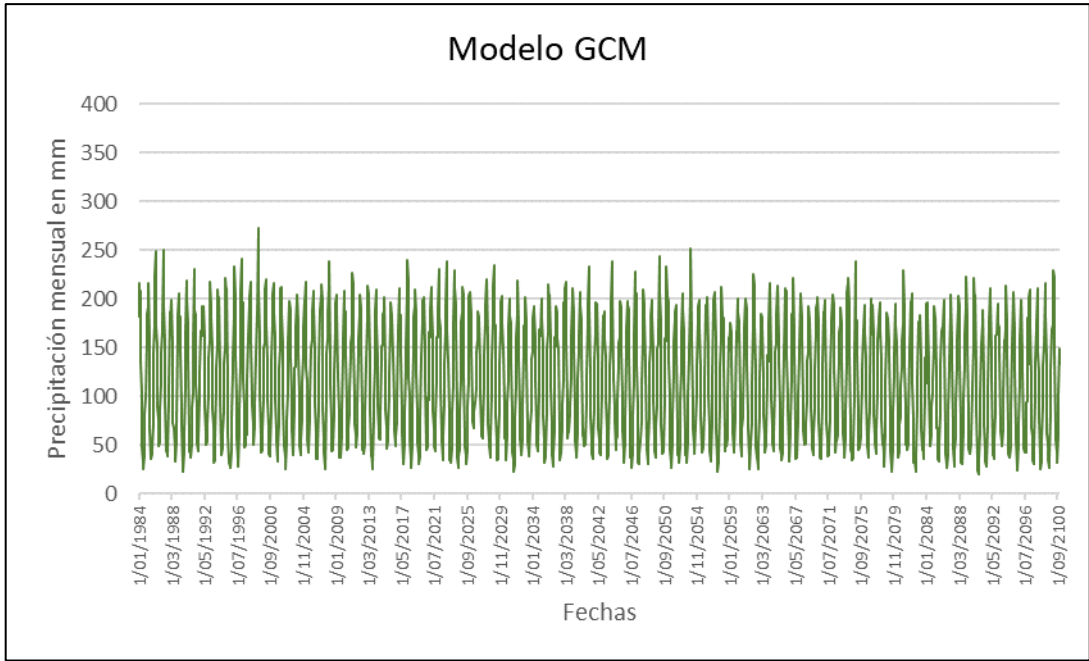


Figura 110: Precipitación mensual de GCM MIROC6

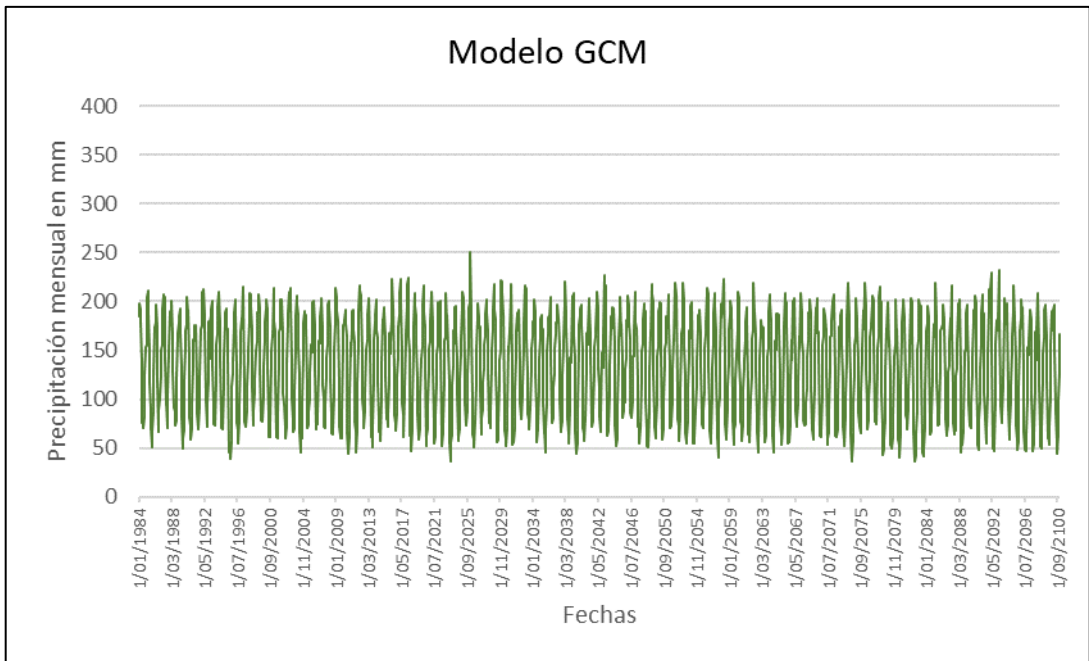


Figura 111: Precipitación mensual de GCM MIROC-ES2L f2

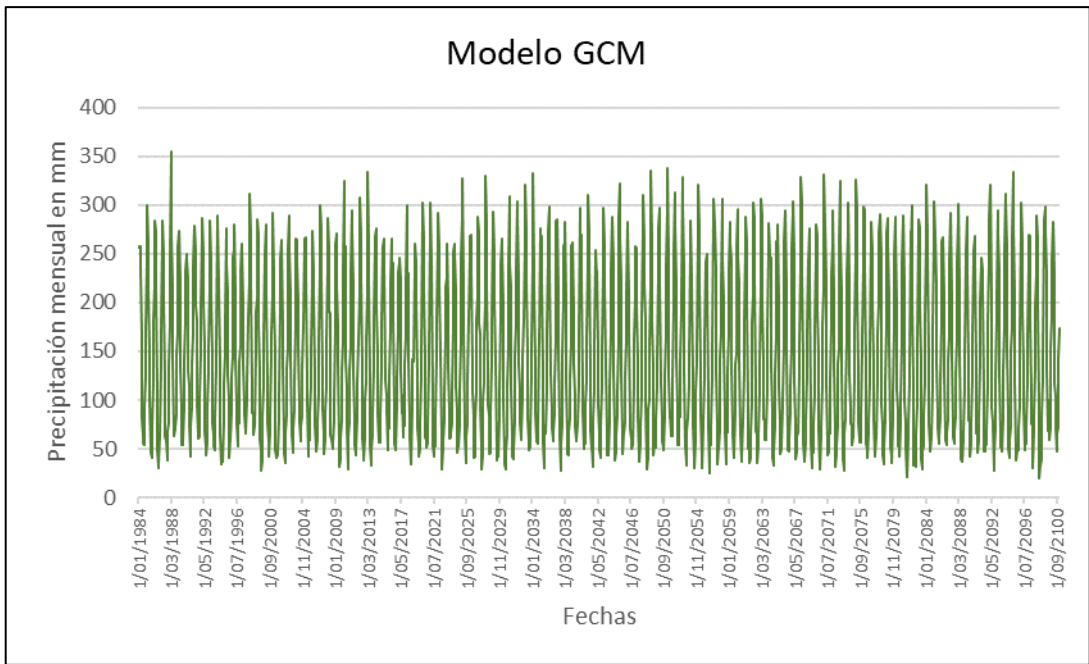


Figura 112: Precipitación mensual de GCM MPI-ESM1-2-HR

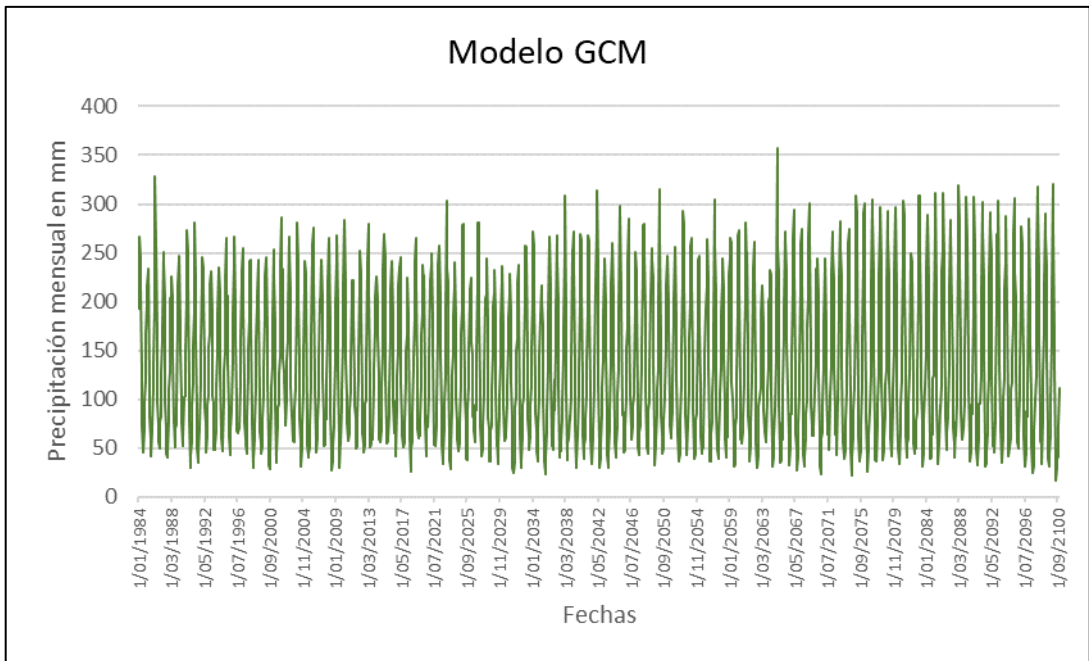


Figura 113: Precipitación mensual de GCM MRI-ESM2-0

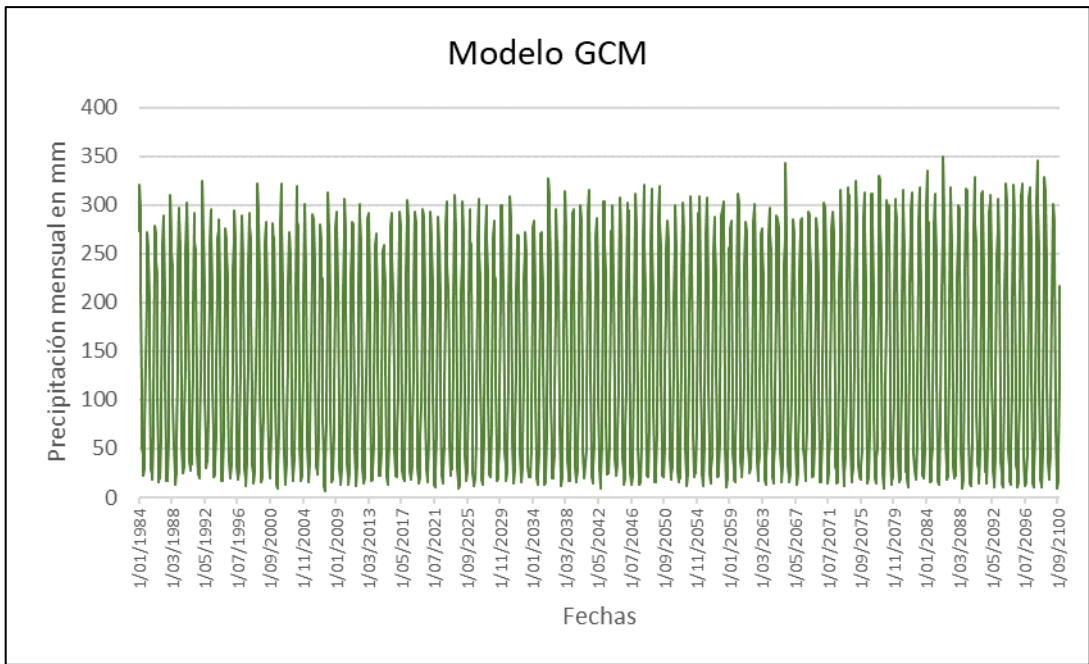


Figura 114: Precipitación mensual de GCM NESM3

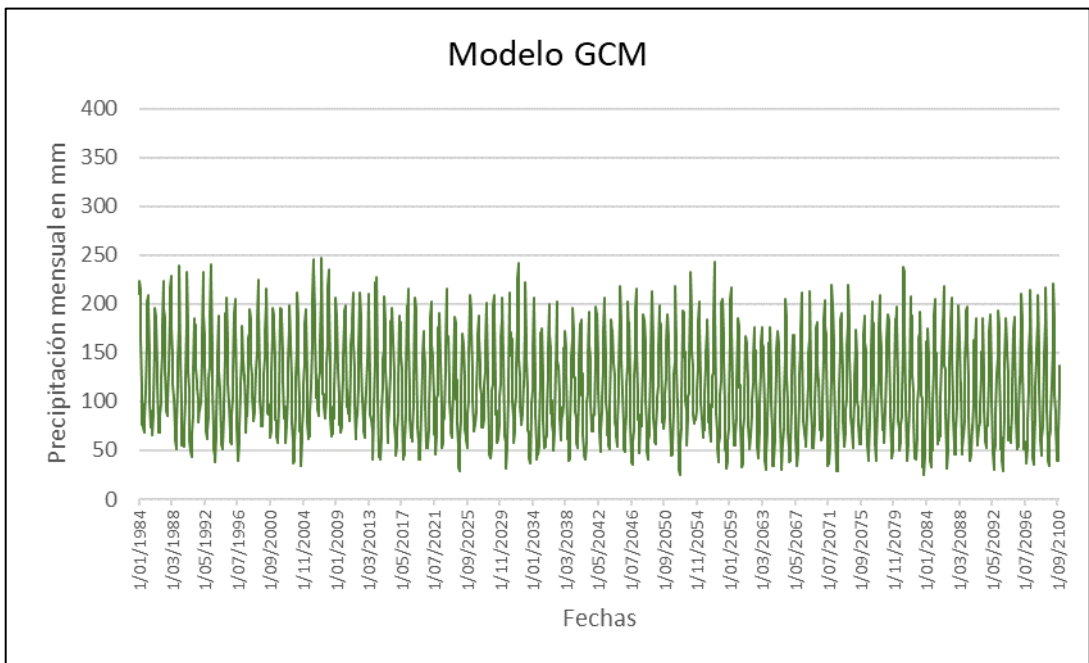


Figura 115: Precipitación mensual de GCM NoESM2-MM

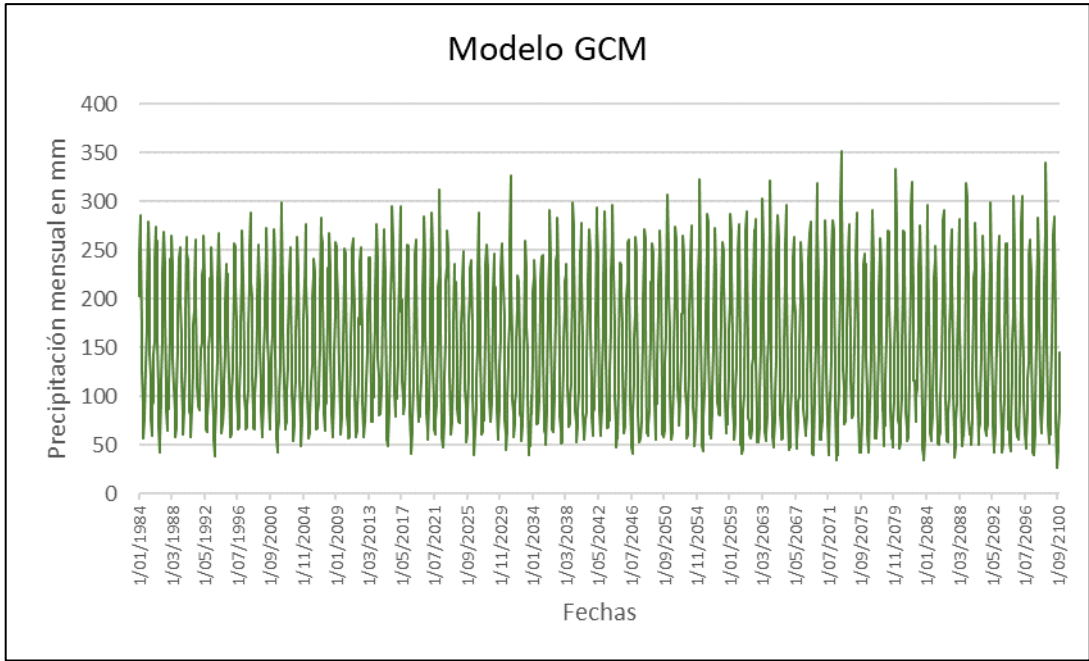


Figura 116: Precipitación mensual de GCM UKESM1-0-LL-f2